المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج



تخصص اتصالات

إلكترونيات الاتصالات

(نظري)

227 تصل

طبعة ١٤٢٩ هـ

مقدمة

الحمد لله وحده، والصلاة والسلام على من لا نبي بعده، محمد وعلى آله وصحبه، وبعد:

تسعى المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني لتأهيل الكوادر الوطنية المدربة القادرة على شغل الوظائف التقنية والفنية والمهنية المتوفرة في سوق العمل، ويأتي هذا الاهتمام نتيجة للتوجهات السديدة من لدن قادة هذا الوطن التي تصب في مجملها نحو إيجاد وطن متكامل يعتمد ذاتياً على موارده وعلى قوة شبابه المسلح بالعلم والإيمان من أجل الاستمرار قدماً في دفع عجلة التقدم التنموي؛ لتصل بعون الله تعالى لمصاف الدول المتقدمة صناعياً.

وقد خطت الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج خطوة إيجابية تتفق مع التجارب الدولية المتقدمة في بناء البرامج التدريبية، وفق أساليب علمية حديثة تحاكي متطلبات سوق العمل بكافة تخصصاته لتلبي متطلباته ، وقد تمثلت هذه الخطوة في مشروع إعداد المعايير المهنية الوطنية الذي يمثل الركيزة الأساسية في بناء البرامج التدريبية، إذ تعتمد المعايير في بنائها على تشكيل لجان تخصصية تمثل سوق العمل والمؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني بحيث تتوافق الرؤية العلمية مع الواقع العملي الذي تفرضه متطلبات سوق العمل، لتخرج هذه اللجان في النهاية بنظرة متكاملة لبرنامج تدريبي أكثر التصاقاً بسوق العمل، وأكثر واقعية في تحقيق متطلباته الأساسية.

وتتناول هذه الحقيبة التدريبية " إلكترونيات الاتصالات " لمتدربي تخصص "اتصالات" في الكليات التقنية موضوعات حيوية تتناول كيفية اكتساب المهارات اللازمة لهذا التخصص.

والإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج وهي تضع بين يديك هذه الحقيبة التدريبية تأمل من الله عز وجل أن تسهم بشكل مباشر في تأصيل المهارات الضرورية اللازمة، بأسلوب مبسط يخلو من التعقيد، وبالاستعانة بالتطبيقات والأشكال التي تدعم عملية اكتساب هذه المهارات.

والله نسأل أن يوفق القائمين على إعدادها والمستفيدين منها لما يحبه ويرضاه: إنه سميع مجيب الدعاء.

الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

1

أساسيات مكبرات العمليات

الجدارة: التعرف على مكبرات العمليات ودراسة خصائصها الفنية والعملية من أجل استخدامها في الدوائر الالكترونية المختلفة.

الأهداف: بعد تدريب هذه الوحدة يكون المتدرب قادراً على:

- أن يتعرف المتدرب على مبدأ عمل مكبر العمليات
- أن يتعرف المتدرب على عناصر مكبر العمليات
- أن يدرس المتدرب التغذية الرجعية السلبية وأثرها على خصائص مكبر العمليات
- أن يتعرف المتدرب على الخصائص العملية لمكبر العمليات
- أن يحلل المتدرب استجابة المكبر في حالة المسار المفتوح
- أن يحلل المتدرب استجابة المكبر في حالة المسار المغلق

الوقت المتوقع للتدريب: 4 ساعات.

1- أساسيات مكبرات العمليات

Basics of Operational Amplifiers

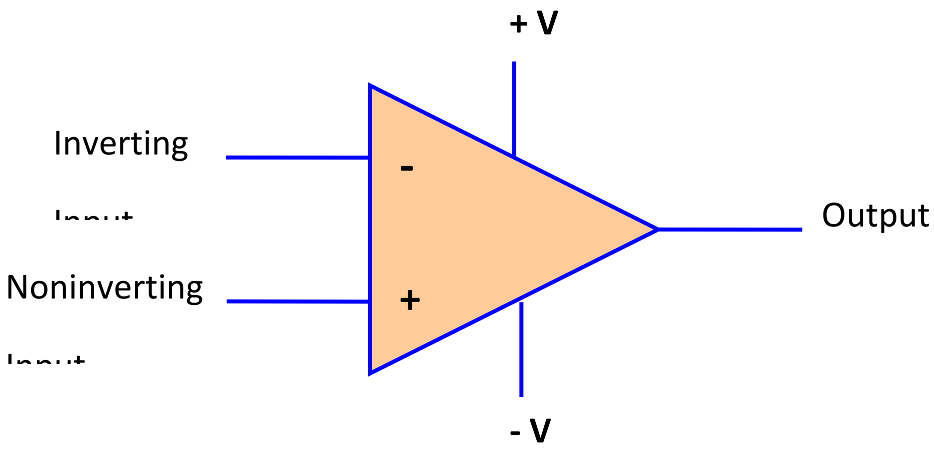
درسنا في المقرر السابق (الكترونيات) 1 العناصر الالكترونية الأحادية الهامة مثل الصمام الثنائي (Diode) بأنواعه والترانزستور بأنواعه أيضاً مع تطبيقاتها الهامة موحد الموجة (Rectifiers) مثبتات الجهد (Voltage regulators) والمكبرات (Amplifiers) والمفاتيح الالكترونية (Electronic Switches).

سوف نبدأ في هذه الوحدة دراسة الدوائر الخطية المتكاملة (Integrated Circuits) والتي تعرف اختصارا (ICs) والتي هي عبارة عن عدد كبير من الترانزستورات، والصمامات الثنائية، والمقاومات والمكثفات والتي تصنع جميعها على شريحة (Chip) من مادة شبه موصل وتغلف بغلاف واقٍ لحمايتها لتكوين دائرة عمليات (تقوم بتنفيذ وظائف وعمليات محددة). إن أشهر مثال على دوائر العمليات هذه هو مكبرات العمليات والتي تعرف اختصاراً (op-amp). تعتبر مكبرات العمليات من العناصر الالكترونية الحديثة والهامة لما لها من مواصفات عالية وتطبيقات هامة. إن ما يهمنا في هذه الوحدة هو دراسة مكبرات العمليات والتعامل معها خارجياً بدون الدخول في تفاصيل تصميمها ومكوناتها الداخلية من القطع الالكترونية، لذلك سوف نقوم بدراسة المواضيع التالية:

- مقدمة لمكبرات العمليات
- معطيات مكبرات العمليات
- التغذية الراجعة السلبية وأثرها على عمل مكبرات العمليات
- حالات عمل مكبرات العمليات
- الاستجابة الترددية

1- 1 مقدمة

منذ بداية ظهورها كانت مكبرات العمليات تستخدم لتنفيذ عمليات رياضية محددة مثل الجمع، والطرح، التكامل والاشتقاق ومن هنا سبب إعطائها صفة واسم العمليات حيث كانت كبيرة الحجم وتحتاج لجهد انحياز عالي لتشغيلها. إن أهم ما يميز مكبرات العمليات الحديثة هو صغر وحجمها، حاجتها لجهد انحياز قليل لتشغيلها ، وثوقيتها العالية ،ورخص ثمنها. يمثل الشكل (1- 1) الرمز المعتمد لتمثيل مكبر العمليات حيث تتضح الأجزاء التالية:



الشكل(1- 1) رمز مكبر العمليات

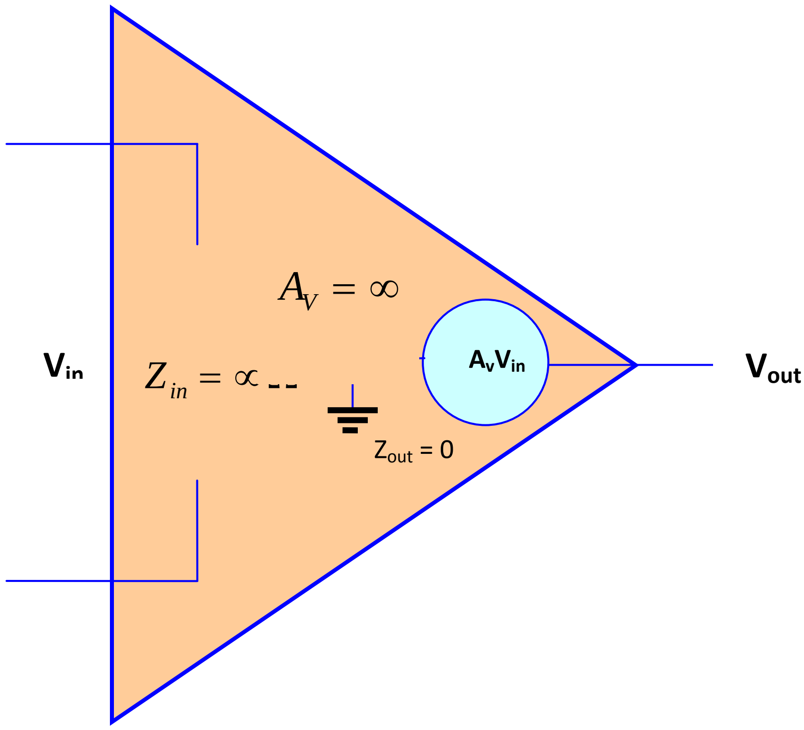
- مدخل عاكس (Inverting Input)
- مدخل غير عاكس (Noninverting Input)
- مخرج (Output)
- طرف توصيل الجهد الموجب
- طرف توصيل الجهد السالب

لغرض تبسيط الرسم في الدوائر اللاحقة سوف نقوم بإزالة توصيلات طرفي الجهد (الموجب والسالب).

هنالك نموذجان لدراسة مكبر العمليات: النموذج العملي (Practical Model) والنموذج المثالي (Ideal Model). في الجدول (1 -1) مقارنة بين النموذجين من ناحية المعطيات الأساسية وهي ممانعة الدخل (Input Impedance, Z_{in})، ممانعة الخرج (Output Impedance, Z_{out})، معامل التكبير (Voltage Gain, A_v) وعرض النطاق الترددي (Bandwidth, BW).

Parameter	Ideal Model	Practical Model
Input Impedance, Z_{in}	Infinity	Very High
Output Impedance, Z_{out}	Zero	Very Low
Voltage Gain, A_v	Infinity	Very High
Bandwidth, BW	Infinity	Very High

لغرض التبسيط، سوف نستخدم خلال الشرح القادم النموذج المثالي لمكبر العمليات والذي يمكننا تمثيله وفقاً للشكل (2- 1).



الشكل (1- 2) النموذج المثالي لتمثيل مكبر العمليات

من المهم العلم بأن عملية التكبير التي يقوم بها مكبر العمليات تتم داخلياً على ثلاث مراحل متتالية:

المرحلة الأولى: تكبير الفرق بين الإشارتين على مدخلي المكبر (Differential Amplifier)

المرحلة الثانية: تكبير إضافي للمرحلة الأولى (Class A amplifier)

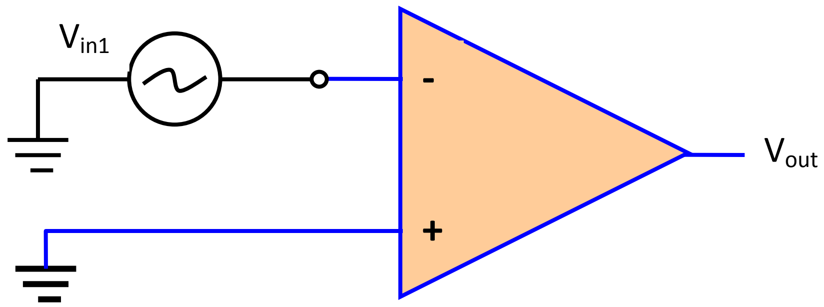
المرحلة الثالثة: تكبير المرحلة النهائية (Push-Pull Amplifier, Class B amplifier

1- 1- 1 أنماط الدخل لمكبر العمليات

هنالك أربعة أنماط أو حالات لمكبر العمليات بالاعتماد على جهة المدخل:

1- نمط مدخل واحد (الإشارة على المدخل العاكس) Single-Ended Input

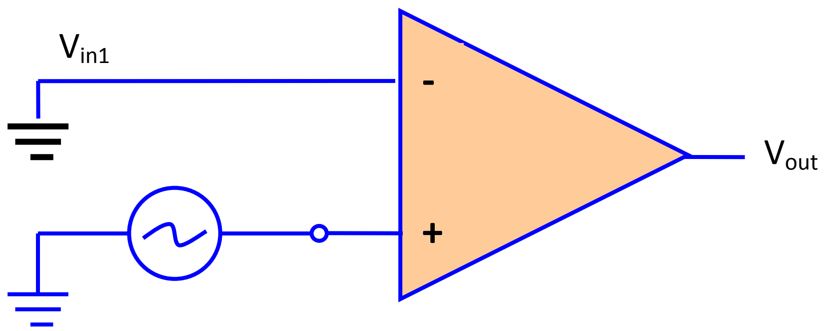
في هذه الحالة يتم توصيل الإشارة على المدخل العاكس بينما الدخل الآخر موصول مع الأرضي. انظر الشكل (1- 3).



الشكل (1- 3) نمط الإشارة على المدخل العاكس

2- نمط مدخل واحد (الإشارة على المدخل غيرالعاكس) Single-Ended Input

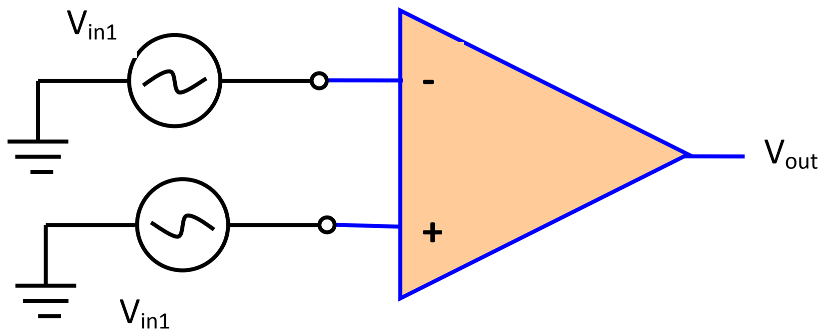
في هذه الحالة يتم توصيل الإشارة على المدخل غير العاكس بينما الدخل الآخر موصول مع الأرضي. انظر الشكل (1- 4).



الشكل (1- 4) نمط الإشارة على المدخل غير العاكس

3- نمط الفرق بين إشارتين Differential Mode Input

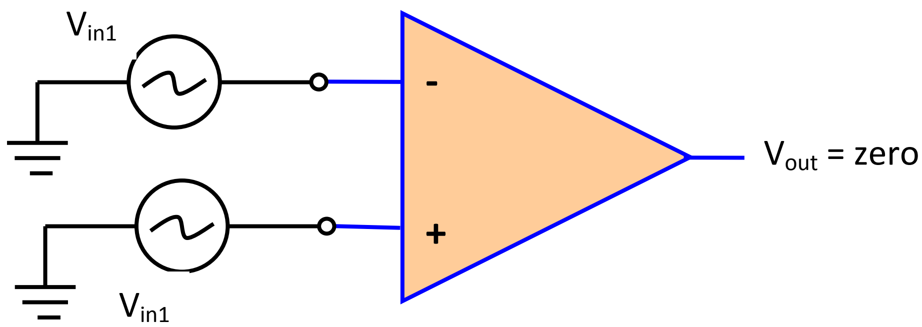
في هذه الحالة يتم توصيل إشارة على كلا المدخلين العاكس وغير العاكس ولكن بشرط أن تكونا متعاكستين (بينهما 180 درجة فرق في الطور) حيث يظهر على مخرج المكبر حاصل طرحهما مكبراً بعدد من المرات وذلك حسب قيمة معامل التكبير. انظر الشكل (1- 5).



الشكل (1- 5) نمط الفرق بين إشارتين

4- نمط الإدخال المشترك Common-Mode Input:

في هذه الحالة يتم توصيل إشارة على كلا المدخلين العاكس وغير العاكس بشرط أن تتطابق الإشارتان من حيث السعة (Amplitude) والتردد (Frequency) والطور (Phase) مما يجعل من حاصل طرحهما صفراً وبالتالي فإن قيم الخرج تساوي الصفر. يستخدم هذا النمط في حالة إلغاء (Rejection) الإشارات غير المرغوب فيها. انظر الشكل (1- 6).



الشكل (1- 6) نمط الإدخال المشترك

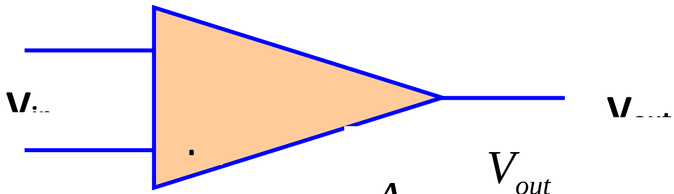
هنالك مجموعة من المعطيات التي يجب معرفتها عن مكبر العمليات أهمها:

1- 1- 2 معدل الإلغاء في نمط الإدخال المشترك Common-Mode Rejection Ratio CMRR:

في حالة الإشارات الغير مرغوب فيها (مثل التشويش والضوضاء) يتم إدخالها إلى المدخلين بنفس السعة والتردد والطور مما يؤدي لإلغائها والحصول على صفر على مخرج المكبر. تقاس جودة المكبر من حيث قدرته على الإلغاء من خلال معدل الإلغاء وفقاً للعلاقة التالية:

$$\text{CMRR} = \frac{A_{ol}}{A_{cm}} \qquad (1\text{-}1)$$

حيث ترمز A_{ol} إلى معدل تكبير المسار المفتوح (معدل تكبير مكبر العمليات بدون أي توصيلات خارجية معه وعادة ما تكون قيمته عالية جداً) و A_{cm} إلى معدل التكبير في حالة النمط المشترك والذي يفترض أن يكون صفر في الوضع المثالي.



$$A_{ol} = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

أحياناً يلزمنا حساب معدل الإلغاء بوحدة الديسبل (**dB**) وفقاً للعلاقة التالية:

$$\text{CMRR} = 20\,Log\left(\frac{A_{ol}}{A_{cm}}\right) \qquad (1-2)$$

للتحول العكسي من ديسبل إلى أرقام عادية نستخدم العلاقة التالية:

$$\text{CMRR} = 20\,Log\left(\frac{A_{ol}}{A_{cm}}\right) = 10^{0.05(Value\,in\,dB)} \qquad (1-3)$$

مثال (1 -1)

لديك مكبر عمليات بالقيم التالية:

$A_{ol} = 120000, \qquad A_{cm} = 0.25$

أوجد معدل الإلغاء CMRR

أ- بالأرقام العادية

ب- بالديسبل

جـ- أوجد CMRR إذا كان $A_{cm} = 0$

الحل:

أ-

$$\text{CMRR} = \frac{A_{ol}}{A_{cm}}$$
$$= \frac{120000}{0.25} = 480000$$

ب- بوحدة الديسبل

$$\text{CMRR} = 20\,Log\left(\frac{A_{ol}}{A_{cm}}\right)$$
$$= 20Log\left(\frac{120000}{0.25}\right) = 20\,Log\,(480000)$$
$$= 113.62\,dB$$

جـ-

$$\text{CMRR} = \frac{A_{ol}}{A_{cm}}$$
$$= \frac{120000}{0} = \infty$$

1- 1- 3 جهد الدخل في نمط الإدخال المشترك Common-Mode Input Voltage Range :

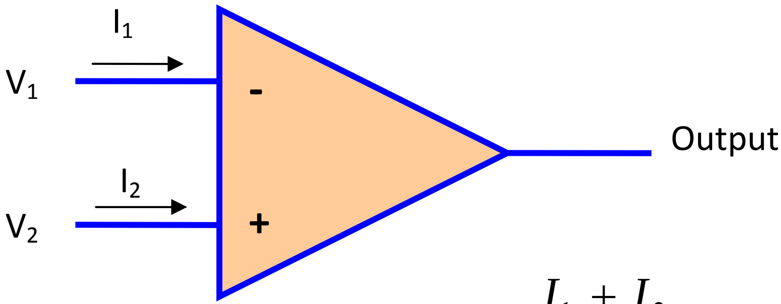
يعرف جهد الدخل في نمط الإدخال المشترك بأنه عبارة عن أعلى قيمة جهد يسمح بإدخالها على طرفي المكبر حتى لا تحصل أي مشكلة في أدائه (تحديد أو تشويه لإشارة الخرج). معظم مكبرات العمليات تتعامل مع جهد (10 V ±) و تغذية (جهد انحياز 15 V ±).

1- 1- 4 جهد الإزاحة على الدخل Input Offset Voltage (V_{OS}) :

في الحالة المثالية عند إدخال جهد يساوي الصفر على الدخل يتم الحصول على صفر على الخرج، في الحالات العملية نلاحظ وجود قيمة صغيرة للجهد المستمر (**dc**) على الخرج لذلك يجب إدخال جهد معين (يعطى في المواصفات الفنية وعادة ما تكون قيمته صغيرة للغاية أقل من 2 mV) على الدخل لتصفير الجهد المتواجد على الخرج.

1- 1- 5 تيار انحياز الدخل Input Bias Current:

عبارة عن التيار المستمر اللازم وجوده على الخل لتشغيل المرحلة الأولى (الجزء الأول) من المكبر وهو عبارة عن متوسط التيارين الداخلين على المكبر (انظر الشكل 1- 7).



$$I_{BIAS} = \frac{I_1 + I_2}{2}$$

الشكل (1- 7) تيار انحياز الدخل

1- 1- 6 تيار الإزاحة على الدخل Input Offset Current (I_{OS}):

في الحالة المثالية فإن تياري الانحياز على الدخل متساويان وبالتالي فالفرق بينهما صفر، لكن في الحالات العملية هنالك فرق بسيط بينهما. يمكننا تعريف تيار الإزاحة على الدخل بأنه الفرق المطلق بين التيارين:

$$I_{OS} = |I_1 - I_2|$$

1- 1- 7 ممانعة الدخل Input Impedance (Z_{in})

هنالك طريقتان لتحديد ممانعة الدخل لمكبر العمليات: حالة نمط التباين (Differential Mode) و حالة النمط المشترك (Common Mode).

ممانعة دخل التباين (Differential Input Impedance): وهي الممانعة الكلية بين الدخل العاكس والدخل غير العاكس.

ممانعة دخل النمط المشترك: وهي الممانعة بين كل دخل والأرضي (Ground).

1- 1- 8 ممانعة الخرج Output Impedance (Z_{out})

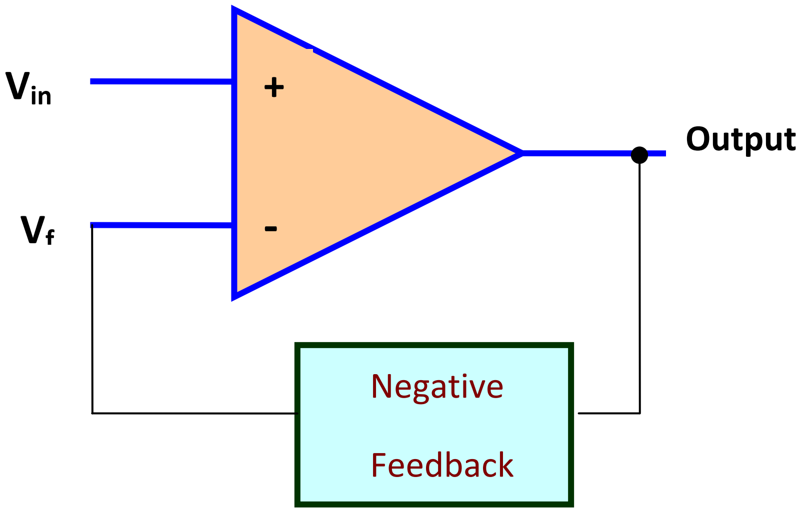
عبارة عن المقاومة التي تظهر من ناحية أطراف الخرج لمكبر العمليات.

وفي الخلاصة فإن للمكبر التشغيلي عدة خصائص إيجابية جعلت مجالات تطبيقه واسعة جداً أهمها:

- ممانعة الدخل كبيرة جداً مما يعني أن التيارات الداخلة صغيرة جداً و تقترب قيمها من الصفر.
- ممانعة الخرج صغيرة جداً.
- نسبة تكبير الجهد عالية جداً ، حيث تصل إلى أكثر من 100000.

1- 2 التغذية الراجعة السالبة Negative Feedback:

تعتبر فكرة التغذية الراجعة من أكثر الأفكار أهمية واستخداماً في مكبرات الإشارات وخاصة مكبرات العمليات وتتلخص الفكرة بإرجاع جزء من جهد الخرج (Output Voltage) إلى المدخل العاكس (Inverting Input) وبالتالي فان الجزء الراجع سيطرح من جهد الدخل (الشكل 1- 8).



الشكل (1- 8) التغذية الراجعة السالبة

الفرق في الطور بين إشارة الدخل V_{in} والإشارة الراجعة V_f يساوي 180 د رجة. إن المقصود بشبكة التغذية الراجعة السالبة (Negative Feedback Network) هو العناصر الكهربائية الأساسية في ذلك المسار والتي غالباً ما تكون مقاومات عادية كما سنرى لاحقاً.

إيجابيات استخدام التغذية الراجعة السالبة:

1- التحكم بقيمة معامل التكبير A_{ol} ذو القيمة العالية جداً والتي لا يمكن لمكبر العمليات أن يتعامل معها ويعطي قيم خرج منطقية لا تتجاوز حدود الإشباع له (عادة تعطى في المواصفات الفنية). في هذه الحالة وبعد استخدام التغذية الراجعة السالبة يسمى التكبير بمعامل تكبير المسار المغلق (Closed Loop Gain) ويرمز لها اختصاراً A_{cl}.

2- التحكم بقيمة ممانعة الدخل Z_{in} من حيث الزيادة أو النقصان.

3- التحكم بقيمة ممانعة الخرج Z_{out} من حيث تصغيرها.

4- التحكم بزيادة عرض النطاق الترددي لمكبر العمليات.

مثال (1- 2)

لديك مكبر عمليات عاكس بمعامل تكبير المسار المفتوح A_{ol} = 100,000 وقيمة جهد الإشباع له ± 14 V . أوجد جهد الخرج إذا علمت أن جهد الدخل يساوي 1mV فقط.

الحل:

قيمة جهد الخرج:

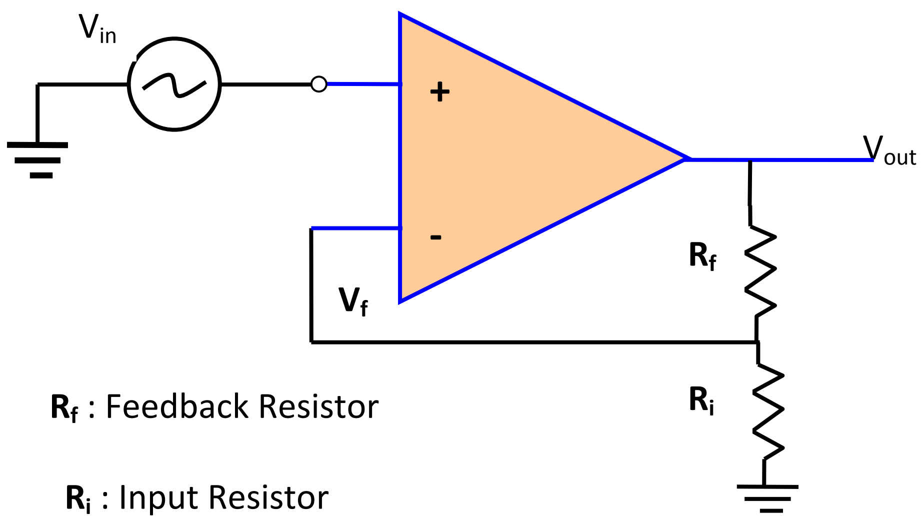
$$V_{out} = A_{OL}V_{in} = 10^5 \times 1\,\text{mV} = -100\ \text{V}$$

وهذه القيمة الناتجة تتجاوز بكثير حدود المكبر (± 14 V) مما يتسبب بتشويه شكل الإشارة الناتجة على الخرج (ملاحظة: إشارة السالب في الجواب لأن المكبر من النوع العاكس).

1- 3 مكبرات العمليات مع التغذية الراجعة السالبة Op-Amps With Negative Feedback:

1- 3- 1 المكبر غير العاكس Noninverting Amplifier :

في هذه الحالة يتم توصيل إشارة الدخل على المدخل غير العاكس ويتم توصيل دائرة التغذية الراجعة السالبة إلى المدخل العاكس (انظر الشكل 1- 9).



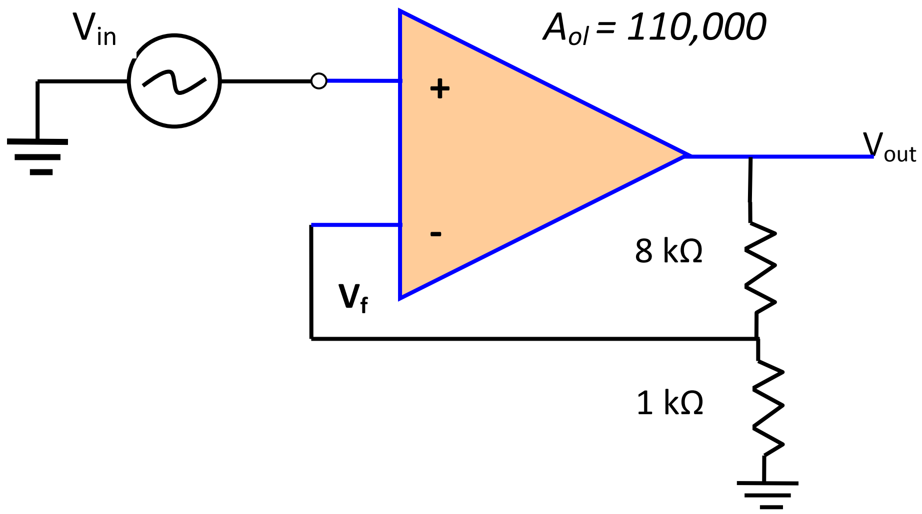
الشكل (1- 9) المكبر غير العاكس

في هذه الحالة يمكننا حساب معامل التكبير حسب العلاقة التالية:

$$A_{CL(NI)} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_i}$$ (1-4)

مثال (1- 3)

لديك دائرة مكبر عمليات غير عاكس حسب الشكل (1- 10):



الشكل (1- 10)

أوجد:

أ- معامل التكبير $A_{CL(IN)}$

ب- قيمة الجهد على الخرج إذا علمت أنة جهد الدخل 1V.

جـ- احسب قيمة المقاومة R_f للحصول على معامل تكبير يساوي (11) علماً أن $R_{in} = 1k\Omega$.

الحل:

أ-

$$A_{CL(NI)} = 1 + \frac{R_f}{R_i} = 1 + \frac{8k}{1k} = 9$$

ب-

$$V_{out} = A_{cl(NI)} V_{in} = 9 \times 1 \text{ V} = +9 \text{ V}$$

جـ-

$$A_{CL(NI)} = 1 + \frac{R_f}{R_i} = 11$$

$$\frac{R_f}{R_i} = 11 - 1 = 10$$

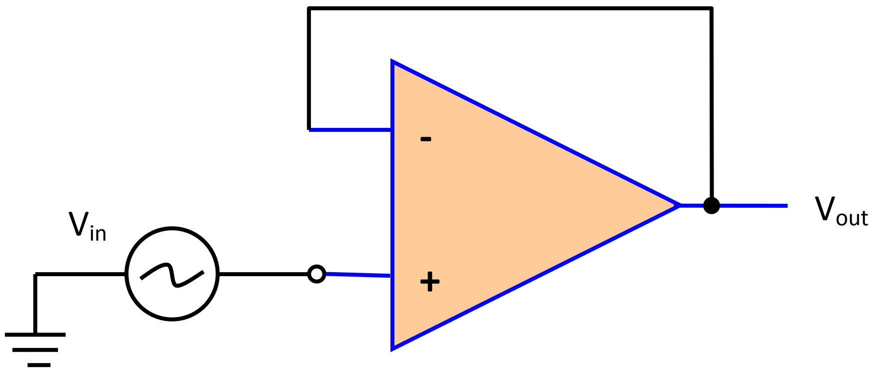
$$\frac{R_f}{1k} = 10 \rightarrow R_f = 10\,k\Omega$$

1- 3- 2 تابع الجهد Voltage Follower :

تابع الجهد هو مكبر عمليات معامل تكبيره يساوي الوحدة.

$$A_{CL(FI)} = 1 \Rightarrow V_{out} = V_{in}$$

وبالتالي فإن تابع الجهد هو حالة خاصة للمكبر الغير عاكس ولكن تم جعل الحد $\frac{R_f}{R_i}$ من علاقة معامل الجهد يساوي صفراً. وللوصول لهذه النتيجة، جعلنا قيمة $R_f = 0$ وألغينا المقاومة R_i كما هو موضح على الشكل (1- 11).



الشكل (1- 11) تابع الجهد

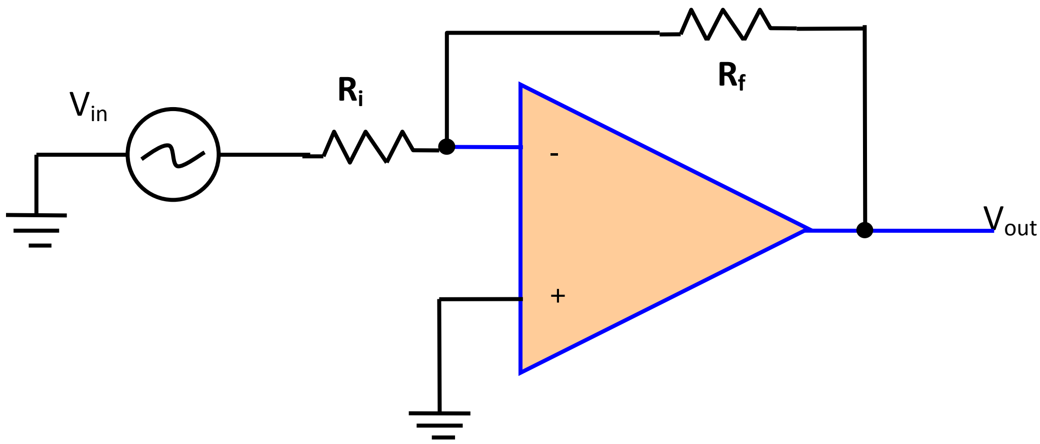
1- 3- 3 المكبر العاكس Inverting Amplifier

في هذه الحالة يتم توصيل إشارة الدخل على المدخل العاكس ويتم توصيل دائرة التغذية الراجعة السالبة إلى المدخل العاكس أيضاً (انظر الشكل 1- 12).

يمكننا حساب معامل التكبير من خلال العلاقة التالية:

$$A_{CL(I)} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_i} \qquad (1\text{-}5)$$

إن السبب في وجود إشارة السالب في العلاقة أعلاه هو توصيل إشارة الدخل إلى المدخل العاكس.



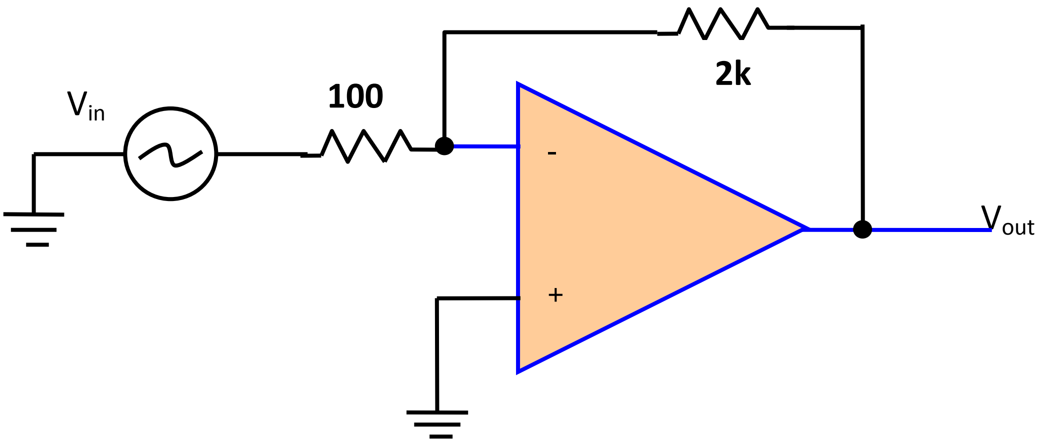
R_f : Feedback Resistor

R_i : Input Resistor

الشكل (1- 12) المكبر العاكس

مثال (1- 4)

لديك دائرة مكبر عمليات عاكس حسب الشكل (1- 13):



الشكل (1- 13)

أوجد:

أ- معامل التكبير $A_{CL(I)}$

ب- قيمة الجهد على الخرج إذا علمت أنة جهد الدخل 200 mV

الحل:

أ-

$$A_{CL(I)} = -\frac{R_f}{R_i}$$

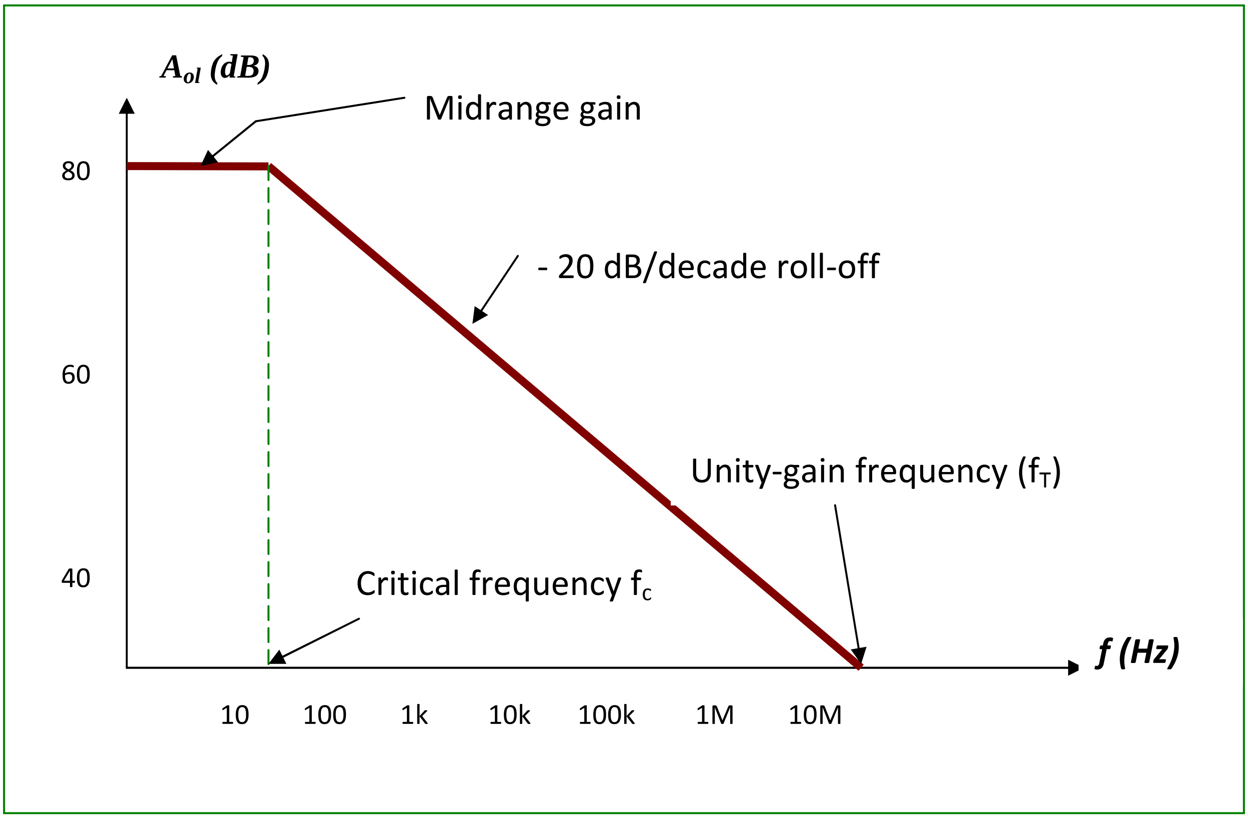
$$= -\frac{2k\,\Omega}{100\,\Omega} = \frac{2000}{100} = -20$$

ب-

$$V_{out} = A_{cl(I)} V_{in} = -20 \times 200\, m\,\text{V} = -4000\, m\text{V} = -4\,\text{V}$$

1- 4 الاستجابة الترددية في حالة المسار المفتوح Open Loop Response

سوف نتناول في هذا الجزء الاستجابة الترددية لمكبر العمليات في حالة المسار المفتوح (المقصود هنا مكبر العمليات بدون توصيل التغذية الراجعة السالبة). في البداية سنشرح كيفية تغير معامل التكبير للمكبر مع تغير التردد وبعدها كيفية تغير فرق الطور (Phase Shift) بين إشارتي الدخل والخرج مع تغير التردد.



الشكل (1- 14) الاستجابة الترددية المثالية في حالة المسار المفتوح لمكبر العمليات

المصطلحات المستخدمة على الشكل أعلاه:

أعلى قيم لمعامل التكبير Midrange Gain ويمكن أن يعطى بالأرقام العادية أو بالديسبل

Midrange Gain in dB = 20 Log (Midrange Gain)

الانحدار بمعدل 20 dB لكل وحدة تغير في التردد - 20 dB/decade roll-off

وحدة تغير التردد تسمى decade وتعني أن كل قيمة على المحور الأفقي عشرة أضعاف التي تسبقها.

التردد في حالة التكبير تساوي الوحدة (يقابلها صفر ديسبل) Unity-gain frequency (f_T)

التردد الحرج Critical Frequency ويتم إيجاده من الرسم على مستوى معامل التكبير ب 3dB أقل من القيمة الكبرى له.

يتضح من الرسم أعلاه أنه بزيادة التردد يبقى معامل التكبير محافظاً على قيمته لفترة ومن ثم يتناقص بشكل خطي وبمعدل 20 dB لكل وحدة تغير في التردد.

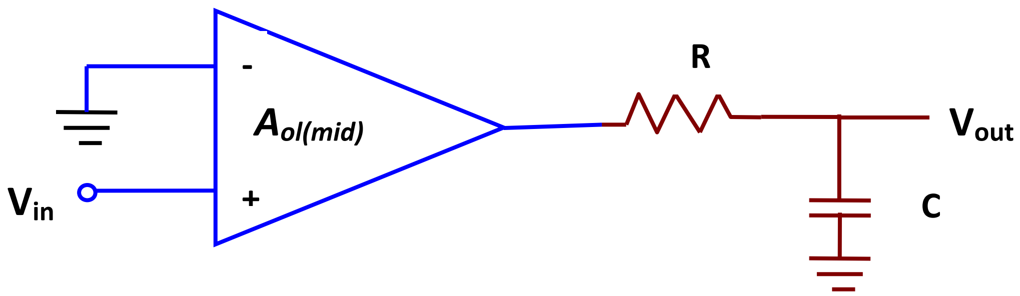
عرض النطاق الترددي على مستوى 3 ديسبل 3 dB Open-Loop Bandwidth :

يتم احتساب عرض النطاق الترددي لمكبر العمليات في حالة المسار المفتوح من خلال إيجاد التردد الحرج من الشكل وذلك على مستوى (3 dB) أقل من القيمة الكبرى.

$$BW = f_c$$

1- 4- 1 تغير معامل التكبير بالاعتماد على التردد:

إن السبب في الانحدار في الشكل أعلاه هو وجود دائرة RC Circuit داخلياً مع المكبر والتي تتسبب في توهين الإشارة عند مرورها عبر مكبر العمليات (انظر الشكل 1- 15).



الشكل (1- 15) مكبر العمليات مع دائرة RC

بناء على ما سبق يمكننا استخدام العلاقة التالية لإيجاد معامل التكبير على أي تردد معطى:

$$A_{ol} = \frac{A_{ol\,(mid)}}{\sqrt{1 + \frac{f^2}{f_c^2}}} \qquad (1\text{-}6)$$

مثال (1- 5)

أوجد معامل التكبير A_{ol} للترددات التالية:

أ- f = 0Hz ب- f =100Hz جـ- f = 1000Hz

علماً أن التردد الحرج f_c = 200 Hz ومعامل التكبير في حالة المسار المفتوح 100,000.

الحل:

أ-

$$A_{ol} = \frac{A_{ol(mid)}}{\sqrt{1+\frac{f^2}{f_c^2}}} = \frac{100,000}{\sqrt{1+0}} = 100,000$$

ب-

$$A_{ol} = \frac{A_{ol(mid)}}{\sqrt{1+\frac{f^2}{f_c^2}}} = \frac{100,000}{\sqrt{1+\frac{100^2}{200^2}}} = \frac{100,000}{\sqrt{1+0.5^2}} = 89442$$

جـ-

$$A_{ol} = \frac{A_{ol(mid)}}{\sqrt{1+\frac{f^2}{f_c^2}}} = \frac{100,000}{\sqrt{1+\frac{1000^2}{200^2}}} = \frac{100,000}{\sqrt{1+5^2}} = 19611$$

مثال (1- 6)

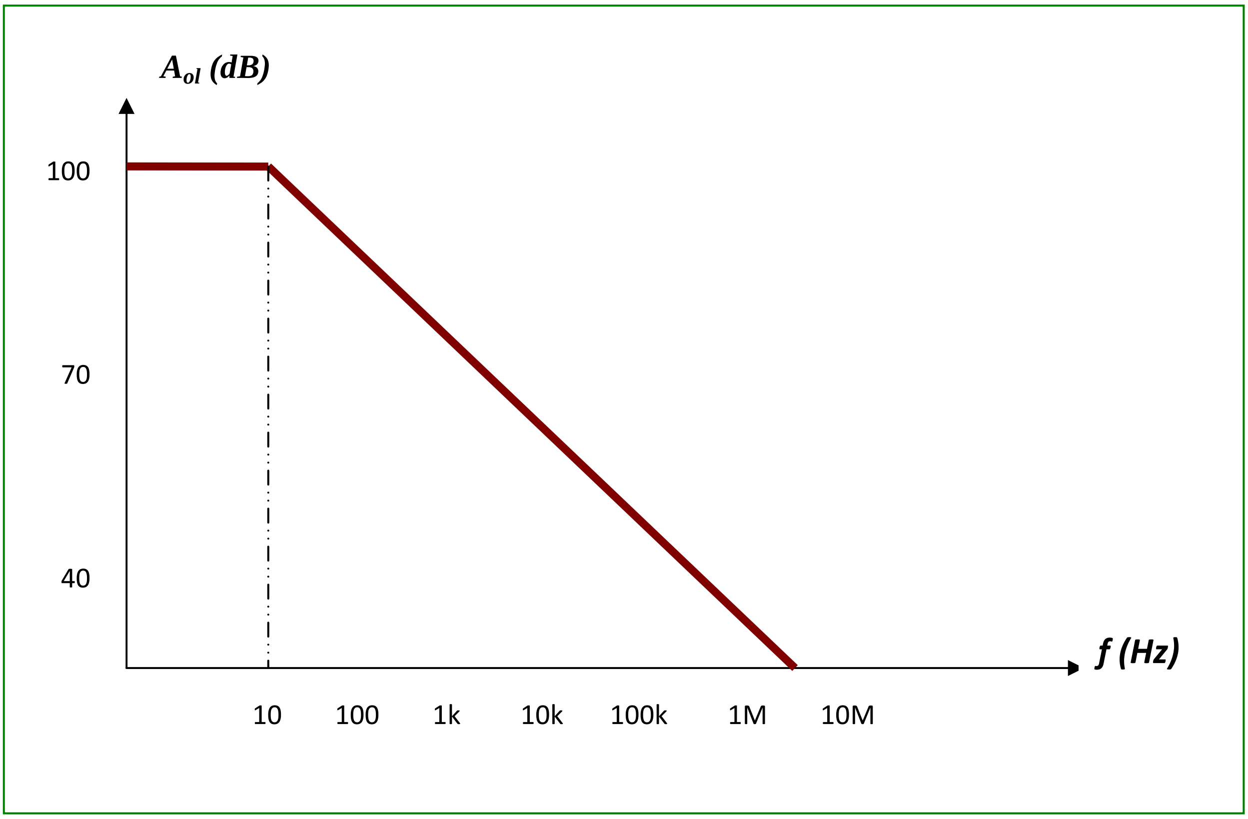
من الرسم المدرج أدناه (الشكل 1- 16) أوجد:

أ- قيمة أعلى تكبير.

ب- التردد الحرج f_c.

جـ- عرض النطاق الترددي.

د- التردد في حالة التكبير يساوي الوحدة.



الحل:

أ- من الرسم، أعلى تكبير يساوي 100 dB (أو ما يعادل 100,000).

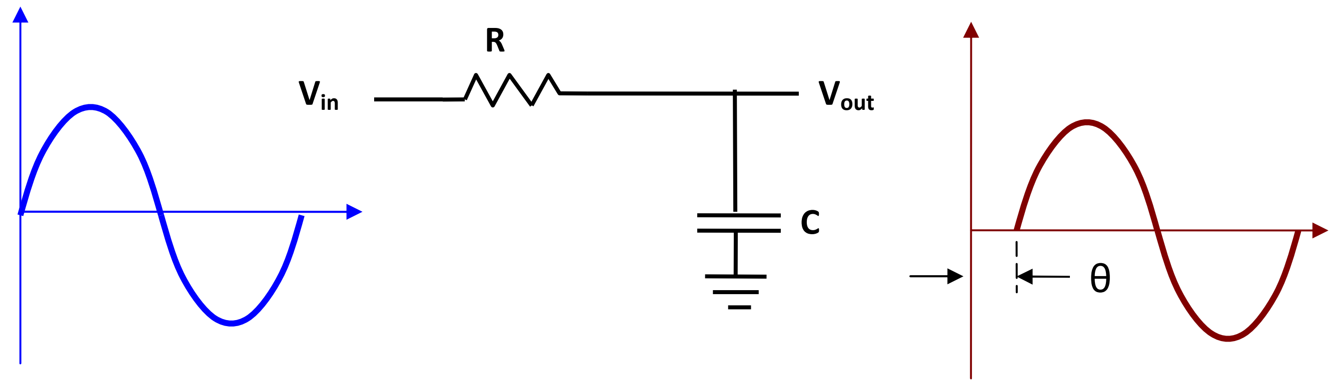
ب- من الرسم نقوم بإنزال خط عمودي عند نقطة بداية الانحدار من أعلى سوف يقابلها تردد 10 Hz.

جـ- عرض النطاق الترددي يساوي التردد الحرج 10 Hz.

د- التردد في حالة التكبير يساوي الوحدة عند نقطة تقاطع الخط المنحدر مع المحور الأفقي 1 MHz.

1- 4- 2 إزاحة الطور Phase Shift :

كما هو معلوم من الدوائر الكهربائية فإن دائرة RC تتسبب في تأخير (Delay) الانتشار بين الدخل والخرج مما يؤدي لظهور إزاحة في الطور بين الإشارة الداخلة والخارجة (الشكل 1- 17).



الشكل (1- 17) دائرة RC وفرق الطور θ

لحساب فرق الطور نستخدم العلاقة التالية:

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{R}{X_C}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{f}{f_C}\right) \qquad (1\text{-}7)$$

الإشارة السالبة في بداية العلاقة تعني أن الخرج يتأخر عن الدخل بزاوية معينة هي θ. كلما زاد التردد تزداد الزاوية θ حتى تصل لقيمة -90° .

مثال (1- 7)

أ- أوجد فرق الطور θ لدائرة RC للترددات التالية علماً أن $f_c = 100\ Hz$:

(a) f = 10 Hz (b) f = 100 Hz (c) f = 1000 Hz

ب- ارسم الشكل الناتج.

الحل:

أ-

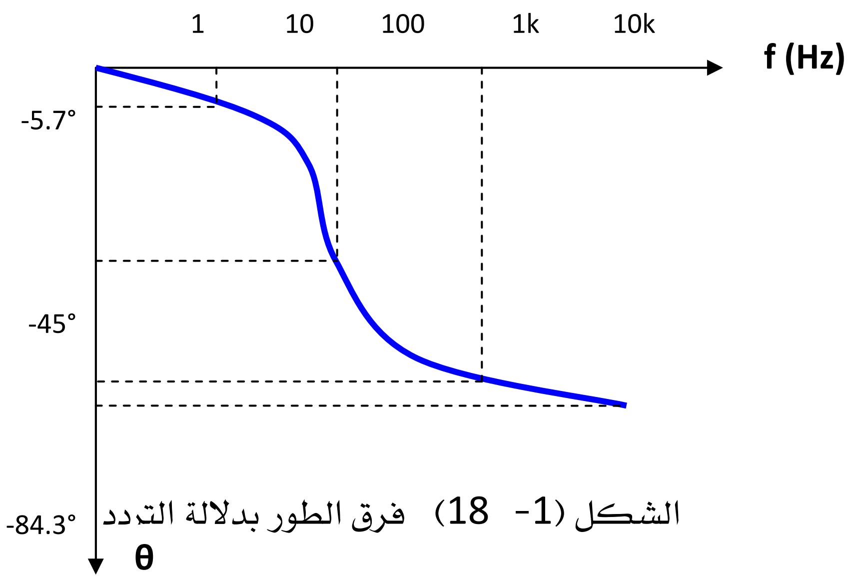
$$(a)\quad \theta = -\tan^{-1}\left(\frac{f}{f_C}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{10}{100}\right) = -5.71^\circ$$

$$(b)\quad \theta = -\tan^{-1}\left(\frac{f}{f_C}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{100}{100}\right) = -45^\circ$$

$$(c)\quad \theta = -\tan^{-1}\left(\frac{f}{f_C}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{1000}{100}\right) = -84.3^\circ$$

ب-

بعد تحديد القيم السابقة على الرسم البياني نحصل على الشكل التالي (1- 18).

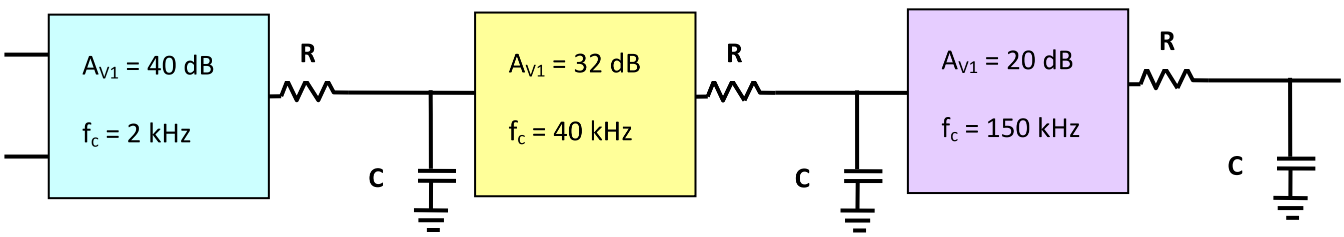


الشكل (1- 18) فرق الطور بدلالة التردد

في حالة توصيل عدد من المكبرات على التوالي يجب اعتماد الاستجابة الترددية الكلية للمجموعة وحساب فرق الطور الإجمالي وذلك وفقاً للمثال التالي.

مثال (1- 8)

لديك مكبر عمليات يحوي ثلاث مراحل من التكبير حسب الشكل أدناه (1- 19):



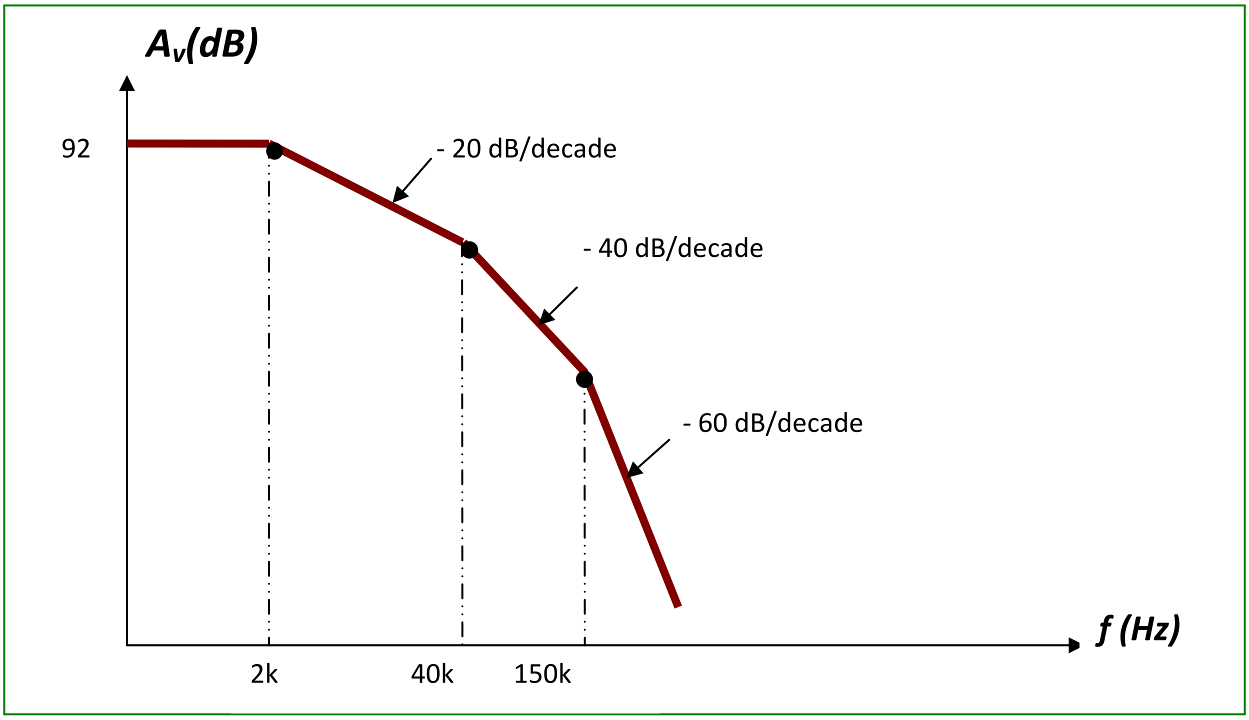
الشكل (1- 19) مكبر عمليات ذو ثلاث مراحل تكبير

أ- ارسم الاستجابة الترددية الكلية للمكبر.

ب- أوجد فرق الطور الكلي θ_{tot} للتردد 2 kHz

الحل:

أ- قيمة التكبير الكبرى الكلية: 40 dB + 32 dB + 20dB = 92 dB



الشكل (1- 20)

ب-

$$\theta_{tot} = -\tan^{-1}\left(\frac{f}{f_{C1}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{f}{f_{C2}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{f}{f_{C3}}\right)$$

$$= -\tan^{-1}\left(\frac{2}{2}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{2}{40}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{2}{150}\right)$$

$$= -45^{\circ} - 2.86^{\circ} - 0.76^{\circ} = -48.6^{\circ}$$

1- 5 الاستجابة الترددية في حالة المسار المغلق Closed Loop Response

غالباً ما تستخدم مكبرات العمليات في حالة المسار المغلق (باستخدام التغذية السلبية الراجعة) وذلك للتحكم بمعامل التكبير وعرض النطاق الترددي. سوف نبين تأثير التغذية السلبية الراجعة على الاستجابة الترددية لمكبر العمليات من خلال النقاط التالية:

- انخفاض معامل التكبير بشكل كبير جداً (من مئات الآلاف إلى آحاد أو عشرات).
- ازدياد قيمة التردد الحرج f_c وذلك وفقاً للعلاقة التالية:

$$f_{c(cl)} = f_{c(ol)} (1 + B A_{ol}) \qquad (1-8)$$

- ازدياد قيمة عرض النطاق الترددي BW وذلك وفقاً للعلاقة التالية:

$$BW_{(cl)} = BW_{(ol)} (1 + B A_{ol}) \qquad (1-9)$$

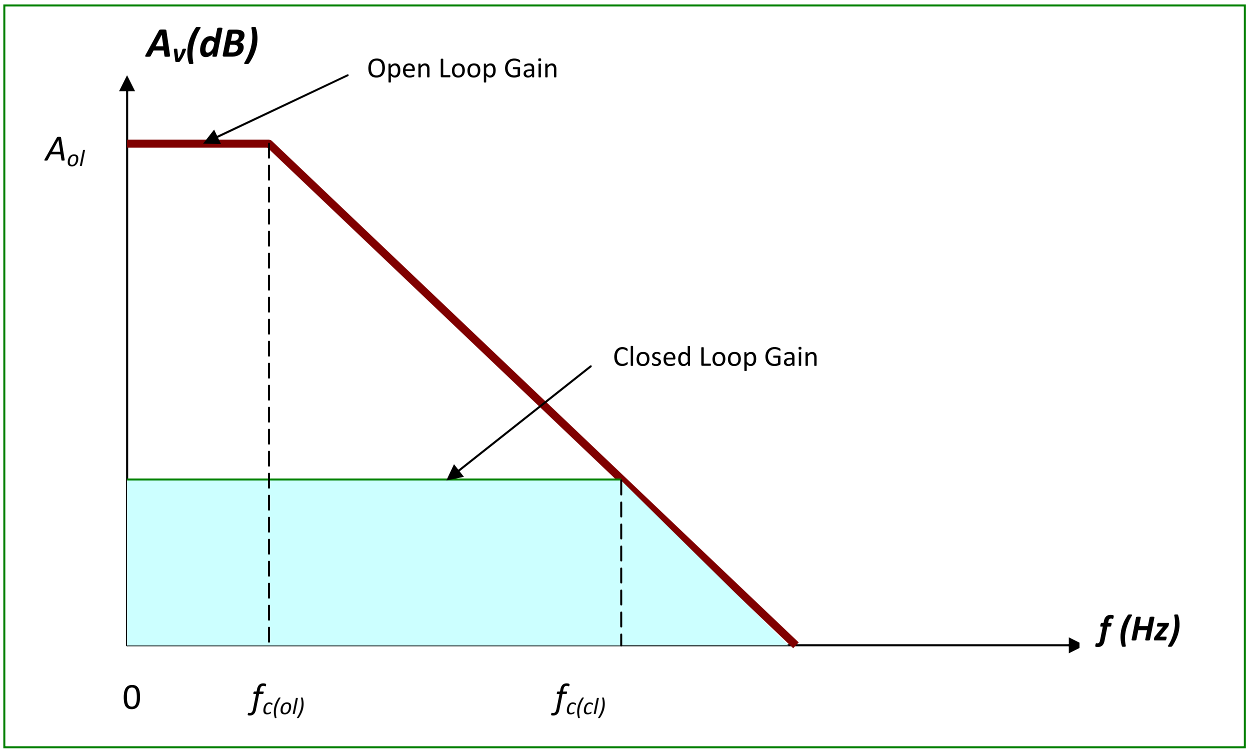
هناك تناسب عكسي بين التردد الحرج وعرض النطاق الترددي بحيث أن حاصل ضربهما يبقى ثابتاً.

$$A_{cl} f_{c(cl)} = A_{ol} f_{c(ol)} \qquad (1-10)$$

$$A_{cl}\, f_{c(cl)} = \text{Unity Gain Bandwidth}$$

(1-11)

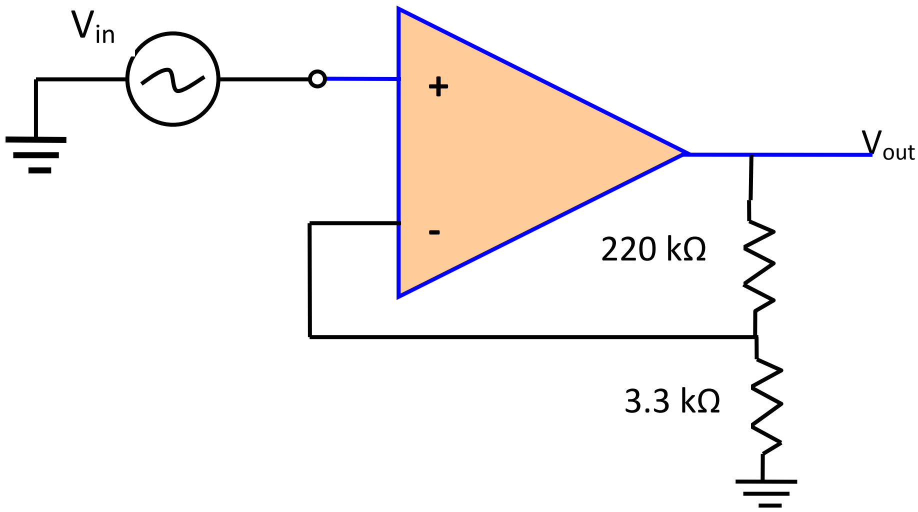
عرض النطاق الترددي في حالة التكبير يساوي الوحدة Unity Gain Bandwidth



الشكل (1- 21) الاستجابة الترددية في حالتي المسار المفتوح والمغلق

مثال (1- 9):

أوجد عرض النطاق الترددي لمكبر العمليات على الشكل (1- 22) أدناه علماً بأن معامل التكبير للمسار المفتوح 100 dB و عرض النطاق الترددي في حالة التكبير يساوي الوحدة 3 MHz.



الشكل (1- 22) مكبر عمليات غير عاكس

الحل:

$$A_{CL(NI)} = 1 + \frac{R_f}{R_i} = 1 + \frac{220\,k}{3.3\,k} = 67.7$$

من العلاقة (1- 11):

$$\boldsymbol{A_{cl}\, f_{c(cl)}} = \textit{unity gain bandwidth}$$

$$f_{c(cl)} = BW_{(cl)} = \frac{\textit{unity gain bandwidth}}{A_{cl}}$$

$$= \frac{3\,MHz}{67.7} = 44.3\,kHz$$

أسئلة وتمارين

1- قارن بين مكبر العمليات المثالي والعملي.

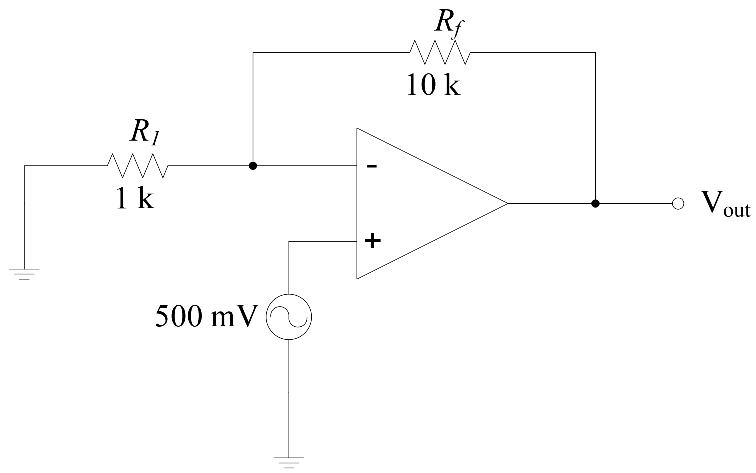
2- لديك مكبرا عمليات بالخصائص التالية:

الأول: $Z_{in} = 5\ M\Omega,\ \ Z_{out} = 100\ \Omega,\ \ A_{ol} = 100000$

الثاني: $Z_{in} = 10\ M\Omega,\ \ Z_{out} = 75\ \Omega,\ \ A_{ol} = 150000$

أيهما أفضل ؟ ولماذا؟

3- أوجد معامل التكبير، و جهد الخرج للمكبر التالي:



الشكل (1- 23)

4- لديك مكبر عمليات بالقيم التالية:

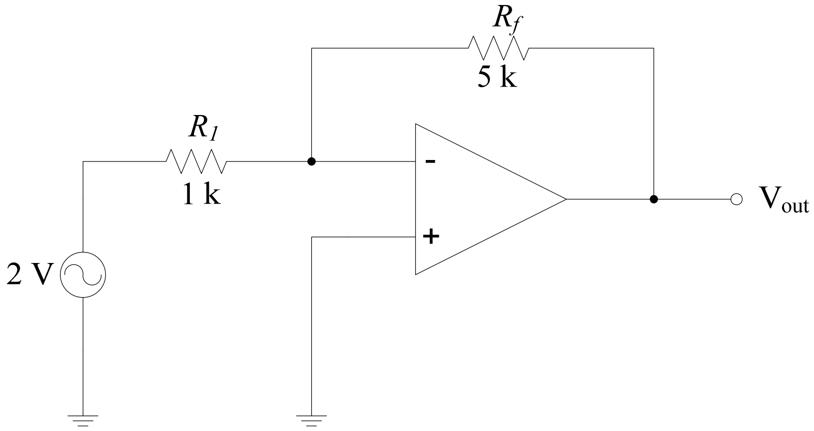
$A_{ol} = 100000, \quad A_{cm} = 0.5$

أوجد معدل الإلغاء CMRR :

أ- بالأرقام العادية.

ب- بالديسبل.

5- أوجد معامل التكبير، و جهد الخرج للمكبر التالي:



الشكل (1- 24)

6- لماذا نستخدم التغذية الراجعة السالبة؟

7- أوجد معامل التكبير A_{ol} للترددات التالية:

أ- f = 0Hz　　ب- f =200Hz　　جـ- f = 5000Hz

علماً أن التردد الحرج $f_c = 500$ Hz ومعامل التكبير في حالة المسار المفتوح 100,000.

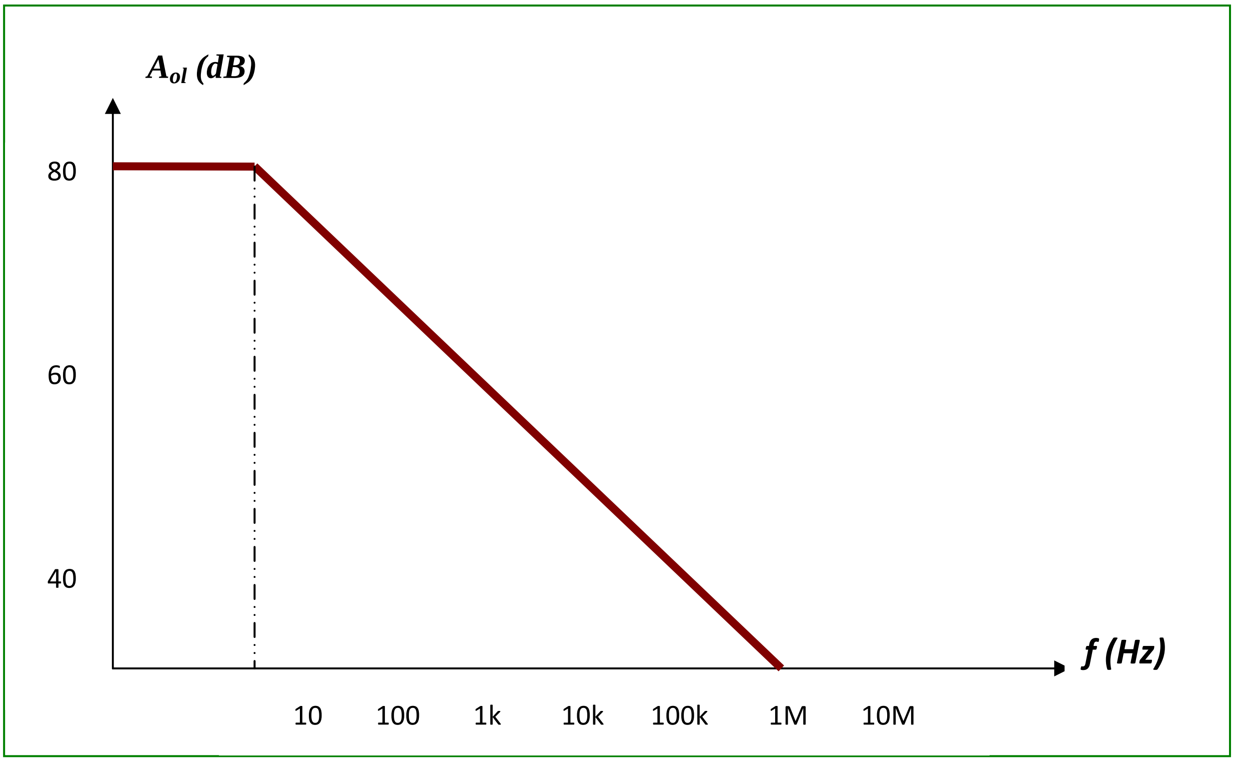
8- من الرسم المدرج أدناه (الشكل 1- 25)، أوجد:

أ- قيمة أعلى تكبير.

ب- التردد الحرج f_c.

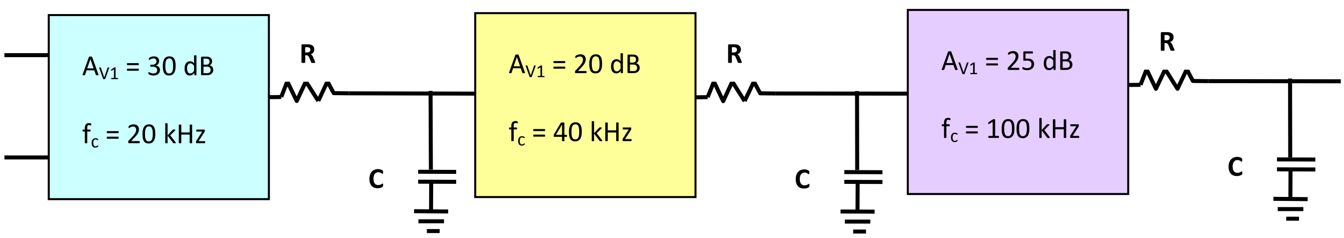
جـ - عرض النطاق الترددي.

د- التردد في حالة التكبير يساوي الوحدة



الشكل (1- 25)

9- لديك مكبر عمليات يحوي ثلاث مراحل من التكبير حسب الشكل أدناه (1- 26):



الشكل (1- 26)

أ- ارسم الاستجابة الترددية الكلية للمكبر.

ب- أوجد فرق الطور الكلي θ_{tot} للتردد 10 kHz

10- ما هو المقصود بتابع الجهد؟ وما الفائدة من استخدامه؟.

تطبيقات مكبرات العمليات

2

الجدارة: التعرف على التطبيقات العملية لمكبرات العمليات وكيفية اختيارها لاستخدامها بالشكل المناسب.

الأهداف: بعد تدريب هذه الوحدة يكون المتدرب قادراً على:

- أن يتعرف المتدرب على التطبيقات العملية لمكبر العمليات .
- أن يحلل المتدرب عمل المكبر المقارن بدوائره المختلفة.
- أن يحلل المتدرب على المكبر الجامع.
- أن يتعرف المتدرب على مكبر التكامل.
- أن يتعرف المتدرب على مكبر الاشتقاق.

الوقت المتوقع للتدريب: 4 ساعات.

2- تطبيقات مكبرات العمليات

Applications of Operational Amplifiers

مقدمة :

تطرقنا في الوحدة السابقة لدراسة مكبرات العمليات من ناحية أساسياتها، ومبدأ عملها وخصائصها الفنية. وسوف نتناول في هذه الوحدة التطبيقات المهمة لمكبرات العمليات وهي:

- المكبر المقارن Comparator.
- المكبر الجامع Summing Amplifier .
- مكبر التكامل Integrators .
- مكبر الاشتقاق Differentiators.

2- 1 المكبر المقارن Comparator :

غالباً ما تستخدم مكبرات العمليات كدائرة مقارن لمقارنة قيمة جهد معين مع قيمة مرجعية أخرى. في هذه الحالة يستخدم مكبر العمليات في حالة المسار المفتوح (Open Loop) بدون وجود التغذية الراجعة السلبية حيث يتم توصيل الجهد المراد مقارنته على أحد المدخلين والقيمة المرجعية (Reference Voltage) على المدخل الآخر.

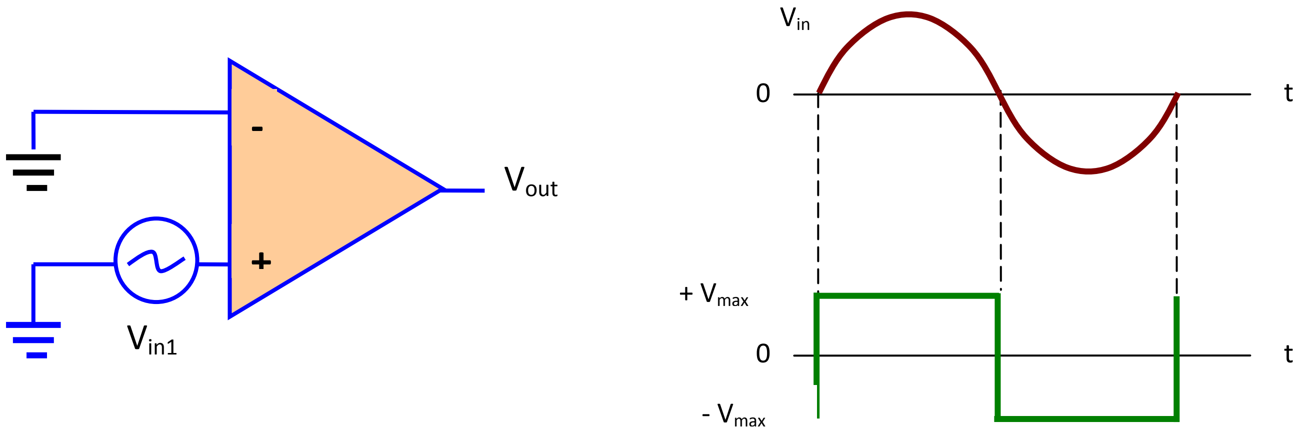
سوف نتعرف على أربع دوائر للمقارن وهي:

- المقارن ذو قيمة مرجعية صفرية Zero-Level Detection .
- المقارن مع البطارية كقيمة مرجعية Battery Reference Comparator .

- المقارن مع مقسم الجهد كقيمة مرجعية Voltage-divider Comparator Reference .
- المقارن مع دايود زينر كقيمة مرجعية Zener diode Reference Comparator .

2- 1- 1 المقارن ذو قيمة مرجعية صفرية Zero-Level Detection :

في هذه الحالة نقوم بتوصيل الجهد على أحد طرفي الدخل للمكبر بينما يتم توصيل الطرف الآخر مع الأرضي للحصول على قيمة صفرية للجهد (الشكل 2- 1).



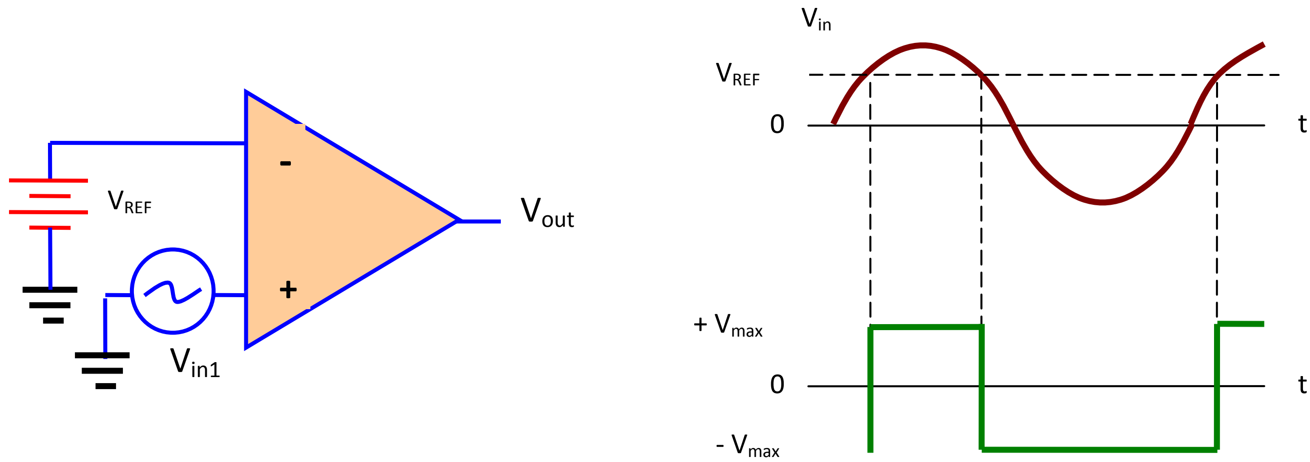
الشكل (2- 1) المقارن ذو قيمة مرجعية صفرية

بسبب معامل التكبير الهائل لمكبر العمليات في حالة المسار المفتوح فإن أقل قيمة للجهد بين طرفي الدخل ستعطي قيمة عالية على الخرج مما يدخل مكبر العمليات مباشرة في حالة الإشباع (Saturation) مما يثبت قيمة جهد الخرج على مستوى $\pm V_{max}$ والتي تكون معلومة للمكبر (معظم مكبرات العمليات لا تتجاوز قيمة جهد الخرج القصوى $\pm 15\ V$) . إذا ما قمنا بتوصيل الجهد للطرف العاكس والأرضي للطرف غير العاكس فسوف نحصل على موجة مربعة مقلوبة بالنسبة للموجة الجيبية.

يتضح من الرسم أعلاه أن هذا النوع من المقارنات يستخدم للحصول على موجة مربعة من الموجة الجيبية.

2- 1- 2 المقارن مع البطارية كقيمة مرجعية Battery Reference Comparator :

في هذا النوع والأنواع اللاحقة سوف تكون قيمة جهد مرجعية لا تساوي الصفر على أحد طرفي المكبر بينما يتم إدخال الجهد على الطرف الآخر. في هذه الحالة قيمة الجهد المرجعية يتم الحصول عليها باستخدام بطارية (الشكل 2- 2).



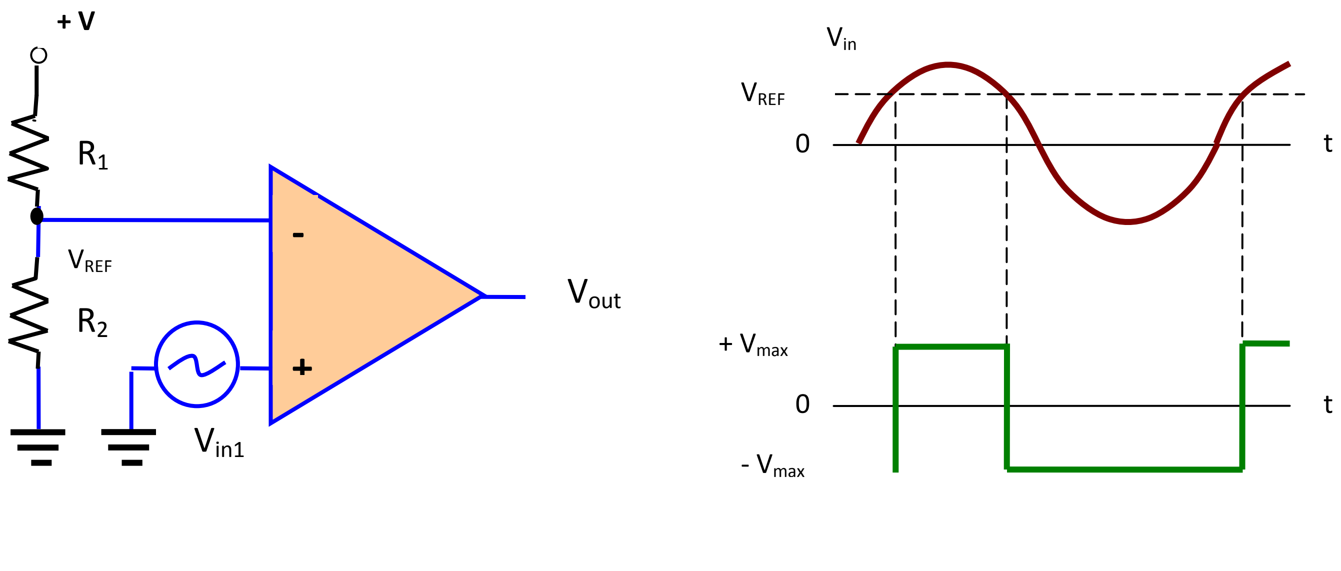
الشكل (2- 2) المقارن مع البطارية كقيمة مرجعية

2- 1- 3 المقارن مع مقسم الجهد كقيمة مرجعية Voltage-divider Reference Comparator :

كبديل للبطارية سوف نقوم بتوصيل قيمة الجهد المرجعية على الطرف العاكس بالاستعانة بمقسم الجهد (Voltage Divider) المكون من المقاومات R_1 و R_2 وفقاً للعلاقة التالية:

$$V_{REF} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}(+V) \qquad (2\text{-}1)$$

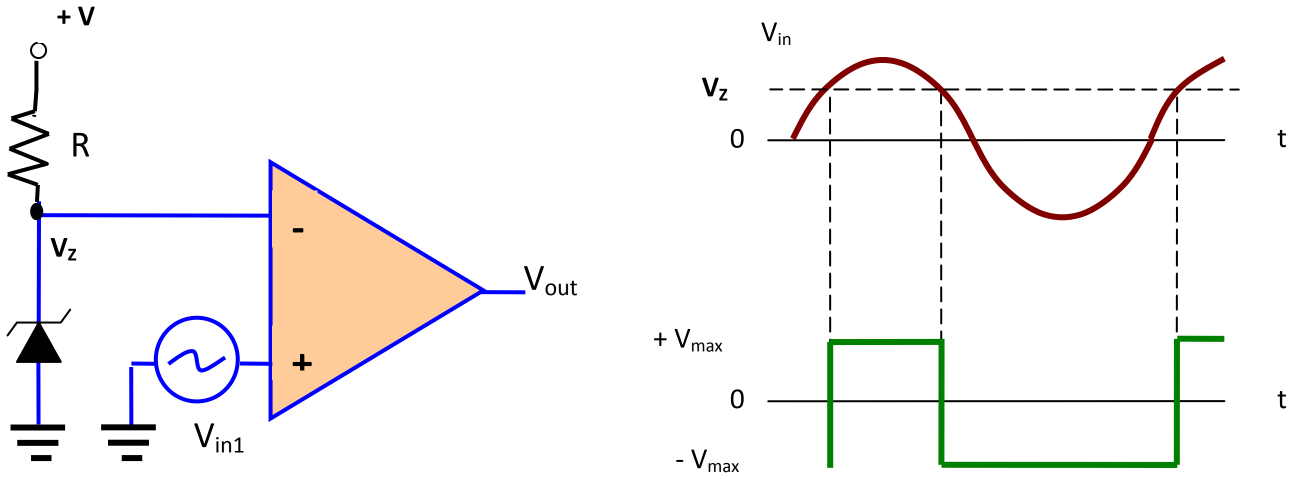
حيث إن $+V$ ترمز لجهد التغذية الموجب الذي يغذي مكبر العمليات. بعد حساب قيمة الجهد المرجعية من العلاقة (2- 1) يتم تحديدها على إشارة الدخل ومن ثم متابعة الرسم كما هو على الشكل (2- 3).



الشكل (2- 3) المقارن مع مقسم الجهد كقيمة مرجعية

2- 1- 4 المقارن مع دايود زينر كقيمة مرجعية Zener diode Reference Comparator :

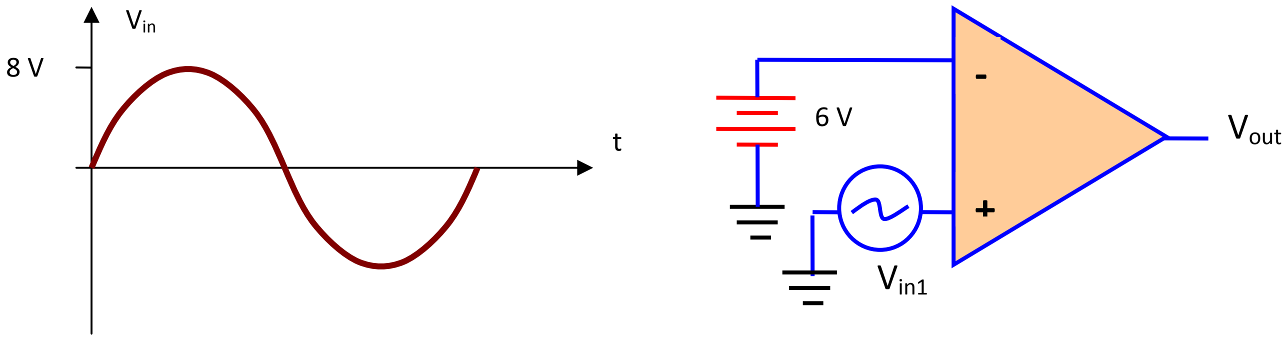
تتميز هذه الدائرة باستخدام دايود زينر لتثبيت وتوصيل قيمة الجهد المرجعية حيث إن $V_Z = V_{REF}$ كما هو موضح على الشكل (2- 4).



الشكل (2- 4) المقارن مع دايود زينر كقيمة مرجعية

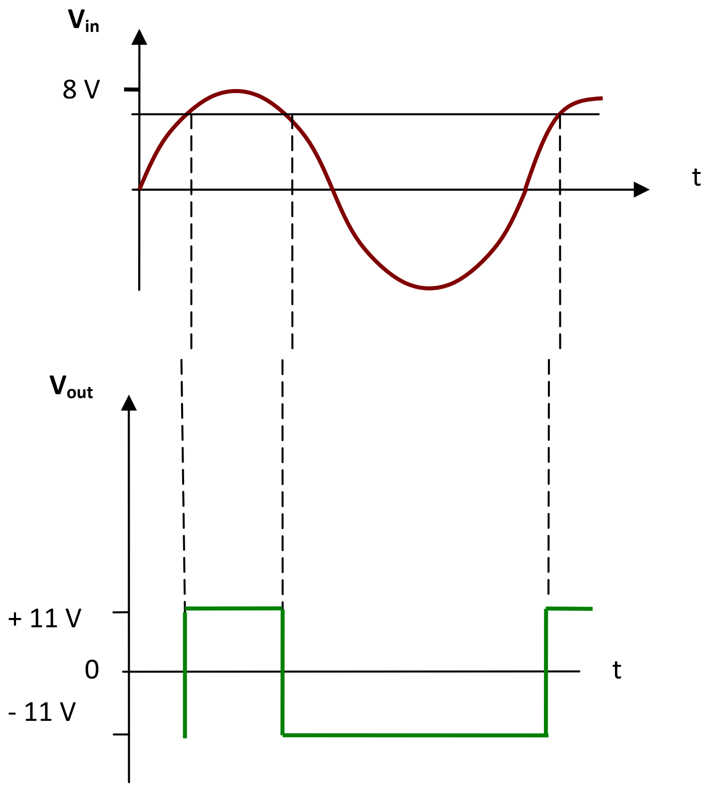
مثال 2- 1:

أرسم الموجة على مخرج المقارن التالي علماً بأن قيمة الجهد القصوى للمكبر ($V_{max} = \pm 11$ V).



الشكل (2- 5)

الحل:



الشكل (2- 6)

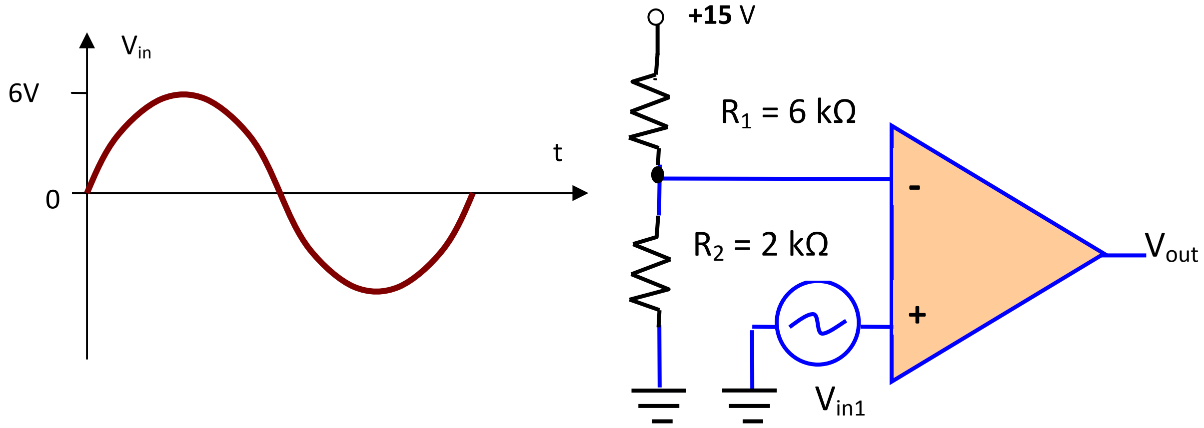
مثال 2=2:

أرسم الموجة على مخرج المقارن التالي علماً بأن قيمة الجهد القصوى للمكبر ($V_{max} = \pm 14\ V$).

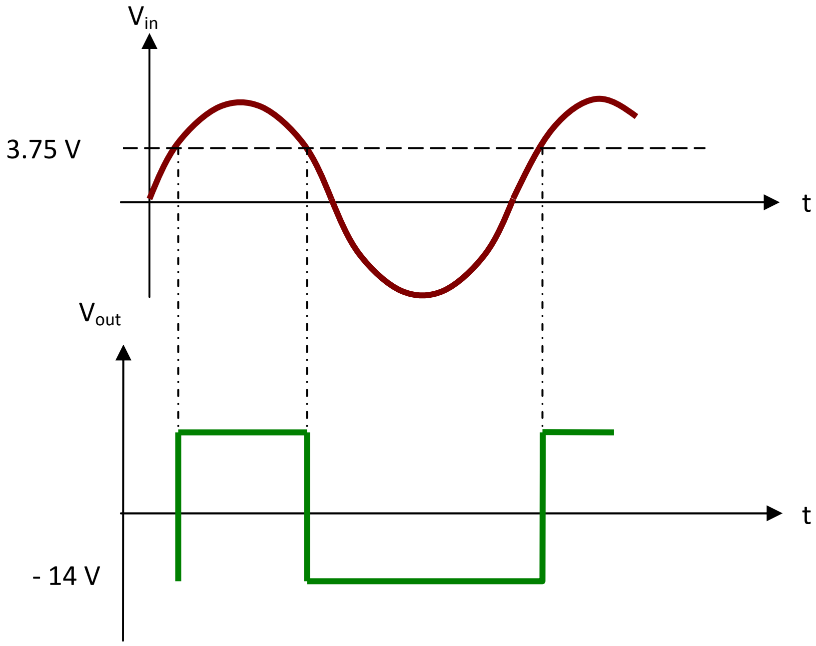
الحل:

باستخدام العلاقة (2- 1) نقوم بحساب قيمة الجهد المرجعية:

$$V_{REF} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}(+V) = \frac{2k}{6k+2k}(+15) = 3.75\ V.$$



الشكل (2- 7)



الشكل (2- 8)

2- 2 المكبر الجامع Summing Amplifier

المكبر الجامع عبارة عن مكبر عمليات في وضع التشغيل العاكس (Inverting) ويمكن أن يكون له أكثر من مدخل موصولة على المدخل العاكس بينما يبقى المدخل غير العاكس موصلاً بالأرضي حيث يقوم بعملية الجمع بين جميع المداخل ويمكننا التحكم بقيمة معامل التكبير لكل مدخل على حده.

سوف نتعامل مع ثلاث حالات للمكبر الجامع:

- المكبر الجامع ذو معامل تكبير يساوي الوحدة Summing Amplifier with Unity Gain.
- المكبر الجامع ذو معامل تكبير أكبر من واحد Summing Amplifier with Gain Greater than Unity.
- المكبر الجامع لإيجاد المتوسط الحسابي Averaging Amplifier.
- المكبر الجامع متغير التكبير Scaling Adder.

في جميع الحالات السابقة يمكننا إيجاد قيم الجهد الناتج على مخرج المكبر وفقاً للعلاقة التالية:

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_1}V_{in1} - \frac{R_f}{R_2}V_{in2} - \frac{R_f}{R_3}V_{in3} - \dots \frac{R_f}{R_N}V_{inN}$$
$$= -R_f\left(\frac{V_{in1}}{R_1} + \frac{V_{in2}}{R_2} + \frac{V_{in3}}{R_3} + \dots + \frac{V_{inN}}{R_N}\right) \quad (2\text{-}2)$$

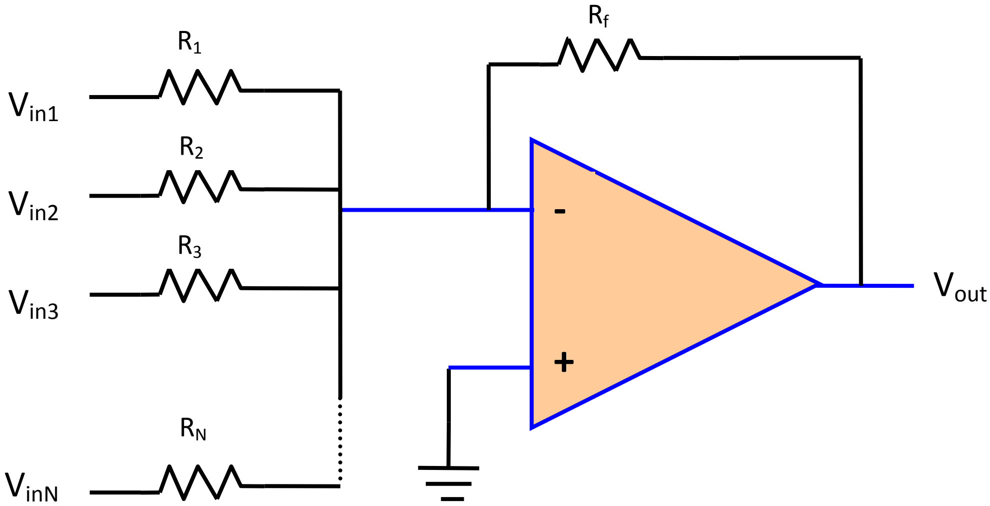
2- 2- 1 المكبر الجامع ذو معامل تكبير يساوي الوحدة Summing Amplifier with Unity Gain.

يوضح الشكل (2- 9) دائرة مكبر جامع ذي عدد مداخل (N). حتى نحصل على معامل تكبير يساوي واحد يجب أن يتحقق الشرط التالي:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_N = R_N = R_f \quad (2\text{-}3)$$

يمكننا إيجاد قيمة الجهد على مخرج المكبر كمجموع جميع القيم المدخلة على الطرف العاكس وفقاً للعلاقة التالية:

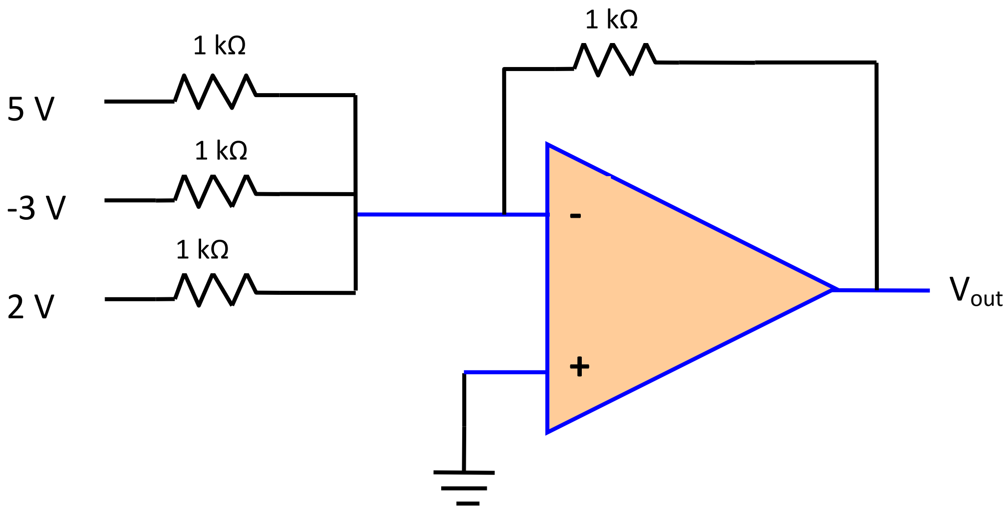
$$V_{out} = -\left(V_{in1} + V_{in2} + V_{in3} + \dots + V_{inN}\right) \quad (2\text{-}4)$$



الشكل (2- 9) المكبر الجامع ذو معامل تكبير يساوي الوحدة

مثال 2- 3:

أوجد الجهد الناتج على مخرج دائرة المجمع التالية (الشكل 2- 10):



الشكل (2- 10)

الحل:

يتضح من الشكل أعلاه أن معامل التكبير يساوي واحد كون جميع المقاومات متساوية القيمة.

$$V_{out} = -\left(V_{in1} + V_{in2} + V_{in3} + . . . + V_{inN}\right)$$

$$V_{out} = -[5V + (-3V) + 2V] = -4V$$

2- 2- 2 المكبر الجامع ذو معامل تكبير أكبر من واحد Summing Amplifier with Gain Greater Than Unity:

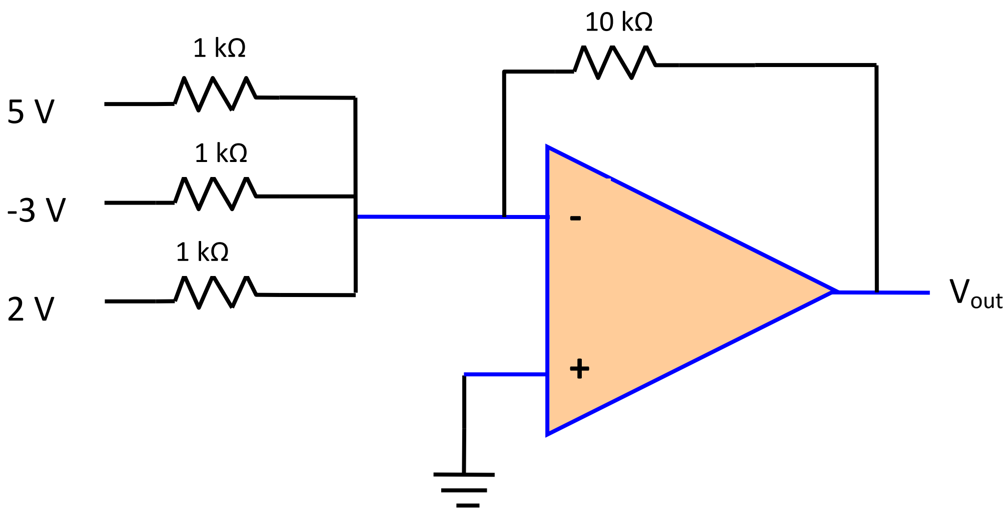
يوضح الشكل (2- 11) دائرة مكبر جامع ذي عدد مداخل (N). حتى نحصل على معامل تكبير لا يساوي واحد يجب أن تكون R_f أكبر من قيمة مقاومة الدخل R_{in}.

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_N = R_N \neq R_f \qquad (2\text{-}5)$$

مزيد من التوضيح في المثال التالي:

مثال 2- 4:

أوجد الجهد الناتج على مخرج دائرة المجمع التالية (الشكل 2- 11):



الشكل (2- 11)

الحل:

يتضح من الشكل أعلاه أن معامل التكبير لا يساوي واحد كون جميع المقاومات متساوية القيمة ولكنها لا تساوي R_f .

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R}\left(V_{in1} + V_{in2} + V_{in3}\right)$$

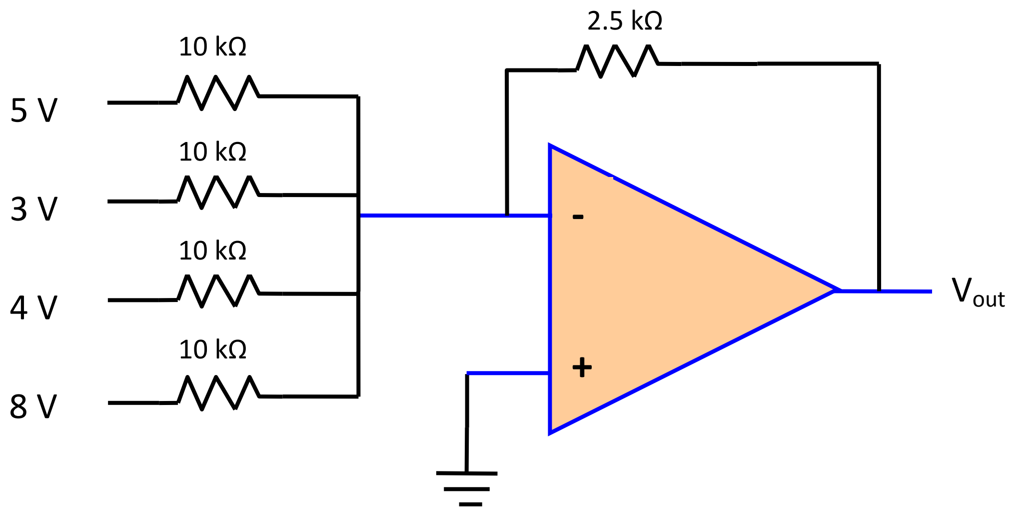
$$V_{out} = -\frac{10\,k\Omega}{1\,k\Omega}\,[5V + (-3V) + 2V] = -40V$$

2- 2- 3 المكبر الجامع لإيجاد المتوسط الحسابي Averaging Amplifier:

تتميز هذه الدائرة بمعامل تكبير أقل من واحد للتمكن من إيجاد المتوسط الحسابي لمجموعة قيم الجهد المدخلة بحيث أن قيمة معامل التكبير تساوي مقلوب عدد المداخل. مزيد من التوضيح في المثال التالي:

مثال 2- 5

أوجد الجهد الناتج على مخرج دائرة المجمع التالية (الشكل 2- 12):



الشكل (2- 12)

الحل:

يتضح من الشكل أعلاه أن معامل التكبير لا يساوي واحد كون جميع المقاومات متساوية القيمة ولكنها لا تساوي R_f .

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R}\left(V_{in1} + V_{in2} + V_{in3} + V_{in4}\right)$$

$$V_{out} = -\frac{2.5\,k\Omega}{10\,k\Omega}[5V + 3V + 4V + 8V] = \frac{-20V}{4} = -5V$$

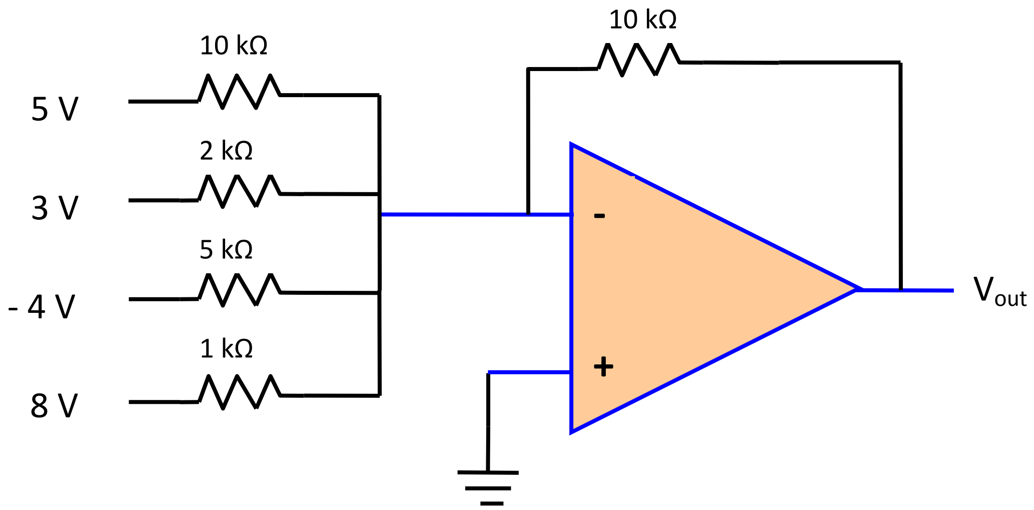
2- 2- 4 المكبر الجامع متغير التكبير Scaling Adder:

تتميز هذه الدائرة بمعامل تكبير متغير حيث يتم تعديل كل جهد على المداخل بمعامل مختلف عن الآخر ولتحقيق ذلك تكون قيم المقاومات على المداخل مختلفة القيمة.

$$R_1 \neq R_2 \neq R_3 \neq R_N \neq R_N \neq R_f$$

مثال 2- 6

أوجد الجهد الناتج على مخرج دائرة المجمع التالية (الشكل 2- 13):



الشكل (2- 13)

الحل:

يتضح من الشكل أعلاه أن معامل التكبير لا يساوي واحد كون جميع المقاومات غير متساوية القيمة.

$$
\begin{aligned}
V_{out} &= -\frac{R_f}{R_1}V_{in1} - \frac{R_f}{R_2}V_{in2} - \frac{R_f}{R_3}V_{in3} - \frac{R_f}{R_4}V_{in4} \\
&= -R_f\left(\frac{V_{in1}}{R_1} + \frac{V_{in2}}{R_2} + \frac{V_{in3}}{R_3} + \frac{V_{inN}}{R_N}\right) \\
&= -10k\left(\frac{5V}{10k} + \frac{3V}{2k} + \frac{-4V}{5k} + \frac{8V}{1k}\right) = \\
&= -5V - 15\,V + 8V - 80V = -92\,V.
\end{aligned}
$$

2- 3 مكبرات التكامل Op-Amp Integrators:

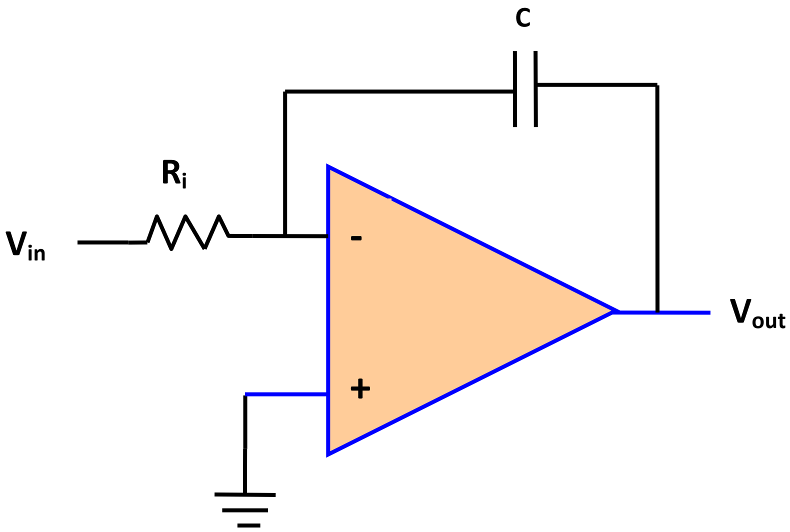
يقوم مكبر التكامل بنمذجة عملية التكامل في الرياضيات أي يقوم بإيجاد التكامل للقيمة المدخلة عليه والذي يعني حساب المساحة تحت المنحنى أو الدالة. يظهر الشكل (2- 14) الشكل المثالي لدائرة مكبر التكامل والذي هو عبارة عن مكبر عاكس مع توصيل مكثف في دائرة التغذية الراجعة يشكل

دائرة RC مع المقاومة الموجودة عند المدخل. كما هو معلوم من الدوائر الكهربائية فإن المكثف يقوم بالشحن وذلك وفقاً للعلاقة:

$$Q = I_C\, t = C V_C \qquad (2\text{-}6)$$

من العلاقة السابقة يمكننا استنتاج العلاقة التالية للجهد على المكثف V_C :

$$V_C = \left(\frac{I_C}{C}\right) t \qquad (2\text{-}7)$$

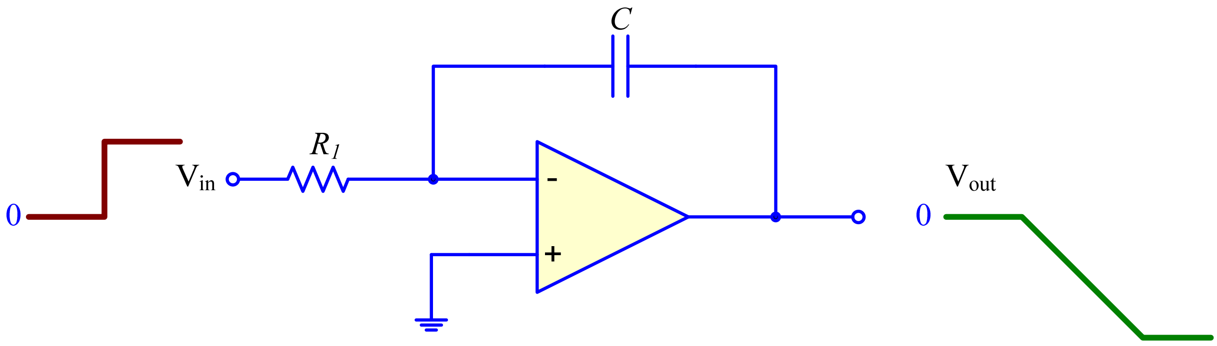


الشكل (2- 14) مكبر التكامل

العلاقة (2- 7) تعتبر علاقة خطية بالنسبة للمتغير t تعطينا خطاً مستقيماً يبدأ من الصفر وبميل ثابت يساوي I_C/C .

فإذا ما أدخلنا جهداً مستمراً والذي يمثل رقماً ثابتاً ، فإن ناتج التكامل هو عبارة عن خط مائل كما في الشكل (2-15). وبذلك يمكن تحويل الموجة المربعة إلى موجة مثلثة ويكون معدل التغير في الخرج هو:

$$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} = -\frac{V_{in}}{RC} \quad (2\text{-}8)$$

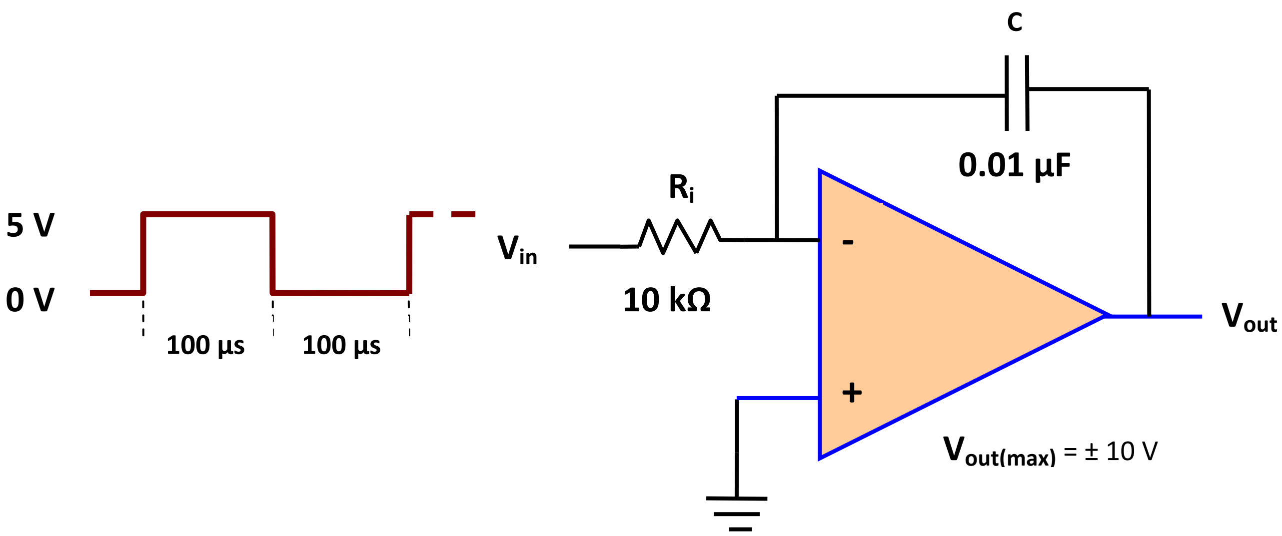


الشكل (2- 15) تكامل قيمة ثابتة

مزيد من التوضيح عن عمل مكبر التكامل انظر مثال 2- 7.

مثال 2- 7:

أرسم موجة الخرج لدائرة مكبر التكامل على الشكل (2- 16).



الشكل (2- 16)

الحل:

نحسب أولاً معدل تغيير الجهد على الخرج باستخدام العلاقة (2- 8):

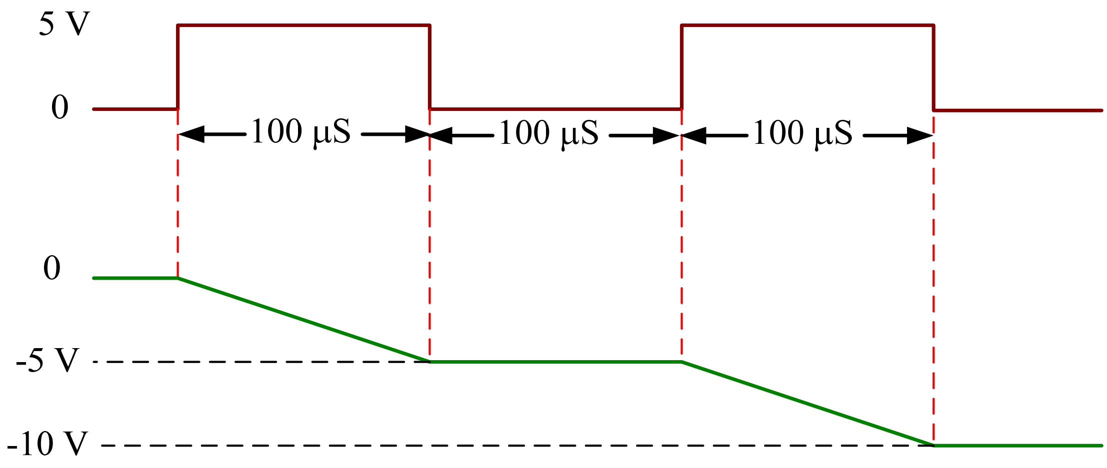
$$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} = -\frac{V_{in}}{RC}$$

$$= -\frac{5V}{10k\Omega \times 0.01\mu F} = -50kV/s = -50mV/\mu s$$

أي أن معدل التغيير لقيمة 100 µs تصبح:

$$-50\ mV/\mu s \times 100\ \mu s = -5\ V$$

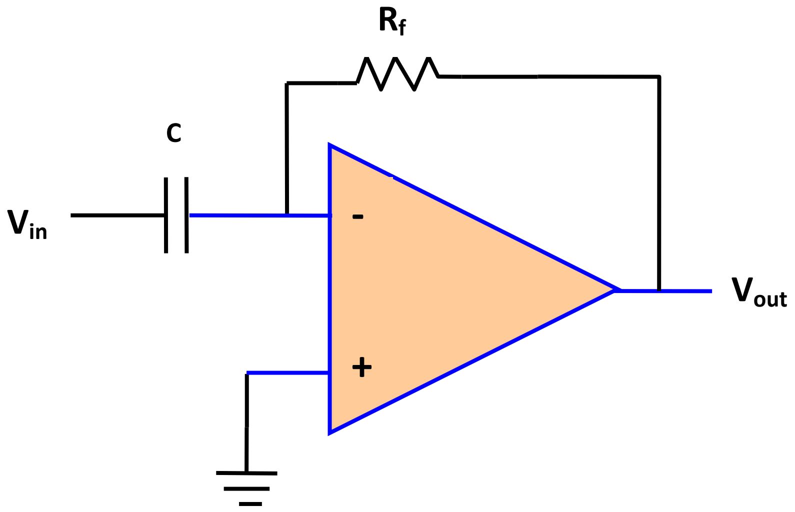
ويكون شكل الموجة الناتجة على مخرج الدائرة كما هو على الشكل أدناه:



الشكل (2-17)

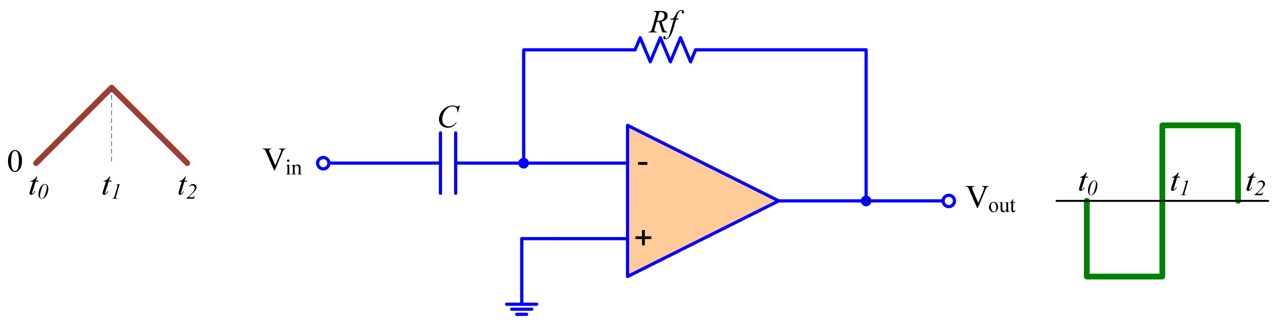
2- 4 مكبرات الاشتقاق Op-Amp Differentiators

يقوم مكبر الاشتقاق بنمذجة عملية الاشتقاق أو التفاضل في الرياضيات والتي تعني إيجاد القيمة اللحظية لمعدل تغيير الدالة أو الاقتران (الميل). يظهر الشكل (2- 18) مكبر الاشتقاق حيث يتم تبديل مواقع المقاومة والمكثف مقارنة مع دائرة مكبر التكامل.



الشكل (2- 18) مكبر الاشتقاق

إذا كانت الإشارة على الدخل عبارة عن خط مستقيم بميل معين، فإن ناتج الاشتقاق هو رقم ثابت يعبر عن مقدار الميل. ولذلك يمكن استخدام مكبر الاشتقاق في تحويل الموجة المثلثة إلى موجة مربعة كما في الشكل (2-19).



الشكل (2- 19) عملية اشتقاق خط مائل والناتج على الخرج

ويُعبر عن قيمة جهد الخرج بالمعادلة التالية:

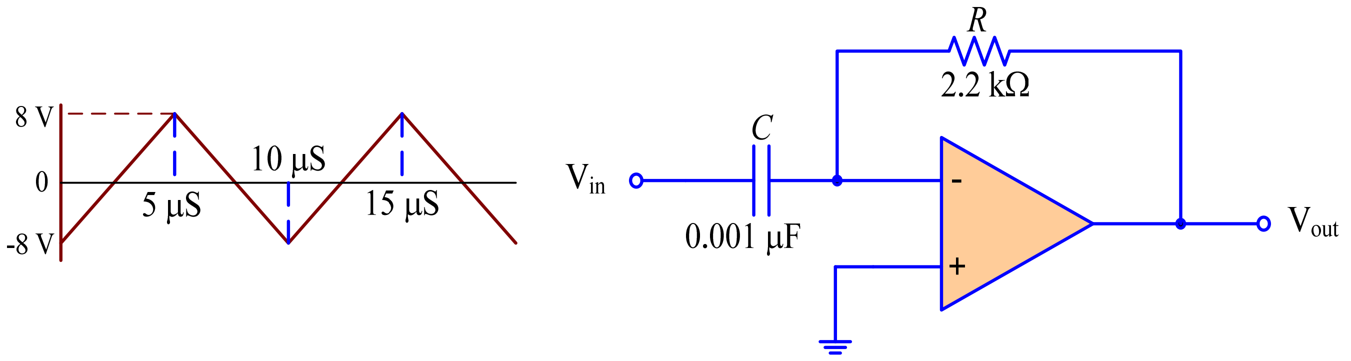
$$V_{out} = I_R R_f = I_C R_f$$

$$V_{out} = -\left(\frac{V_{in}}{t}\right) R_f C \qquad (2\text{-}9)$$

مزيد من التوضيح عن عمل مكبر التكامل انظر مثال 2- 8.

مثال 2- 8

ارسم موجة الخرج لدائرة مكبر الاشتقاق التالية:



الشكل (2- 20)

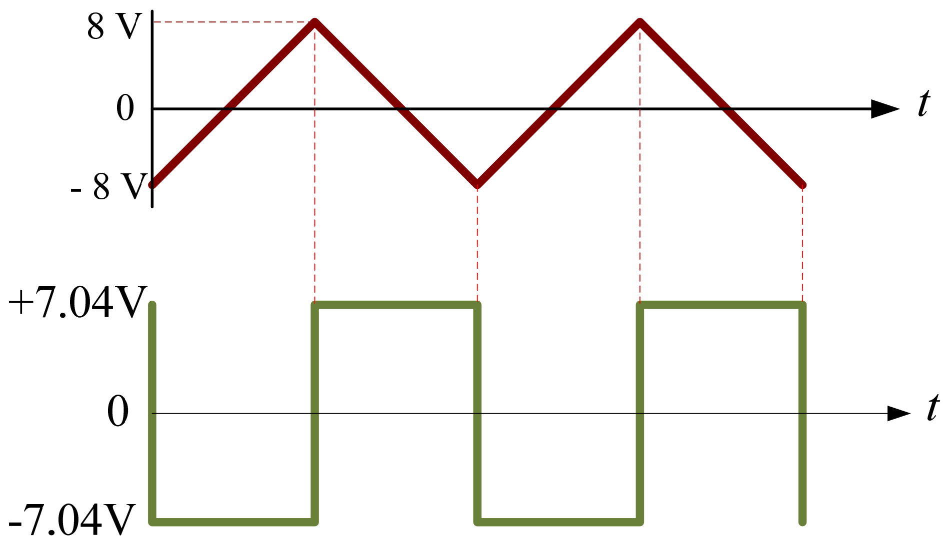
قيمة جهد الخرج في حالة الميل الصاعد:

$$V_{out} = -\left(\frac{V_{in}}{t}\right) R_f C = -\left(\frac{16}{5\,\mu}\right) 2.2\,\text{k} \times 0.001\,\mu = -7.04\ \text{V}$$

وفي حالة الميل السالب (نزول):

$$V_{out} = -\left(\frac{V_{in}}{t}\right) R_f C = -\left(-\frac{16}{5\,\mu}\right) 2.2\,\text{k} \times 0.001\,\mu = +7.04\ \text{V}$$

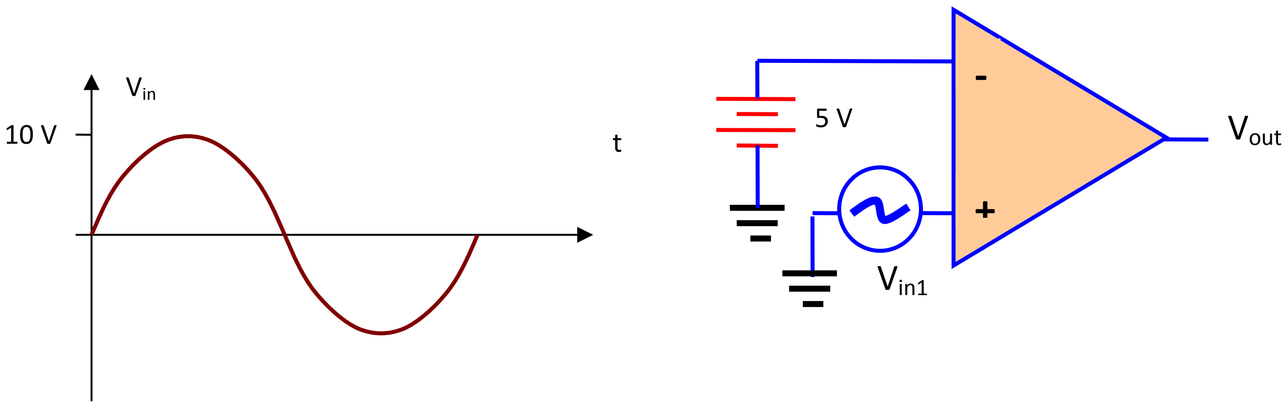
فيكون شكل موجة الخرج على النحو التالي:



الشكل (2- 21)

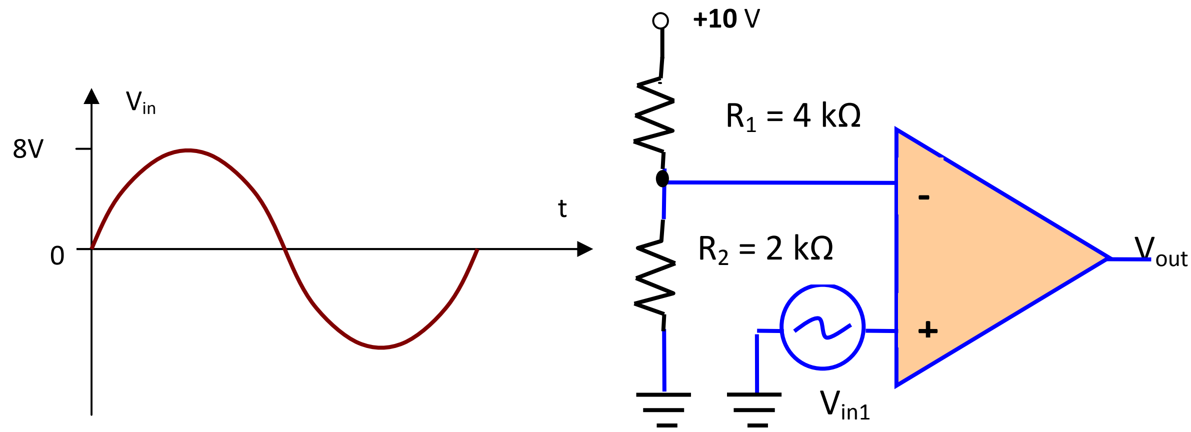
أسئلة وتمارين

1- ارسم الموجة على مخرج المقارن التالي علماً بأن قيمة الجهد القصوى للمكبر ($V_{max} = \pm 11$ V).



الشكل (2- 22)

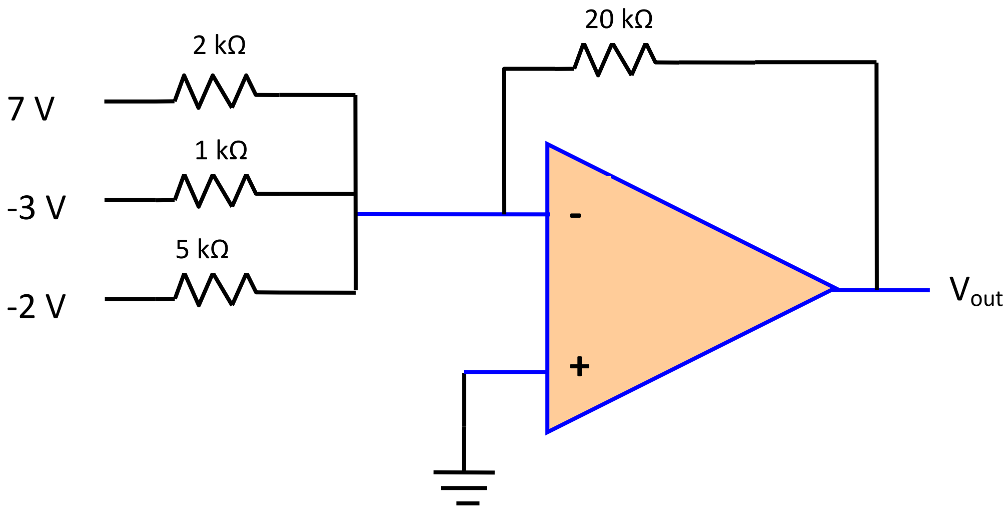
2- ارسم الموجة على مخرج المقارن التالي علماً بأن قيمة الجهد القصوى للمكبر ($V_{max} = \pm 14$ V).



الشكل (2- 23)

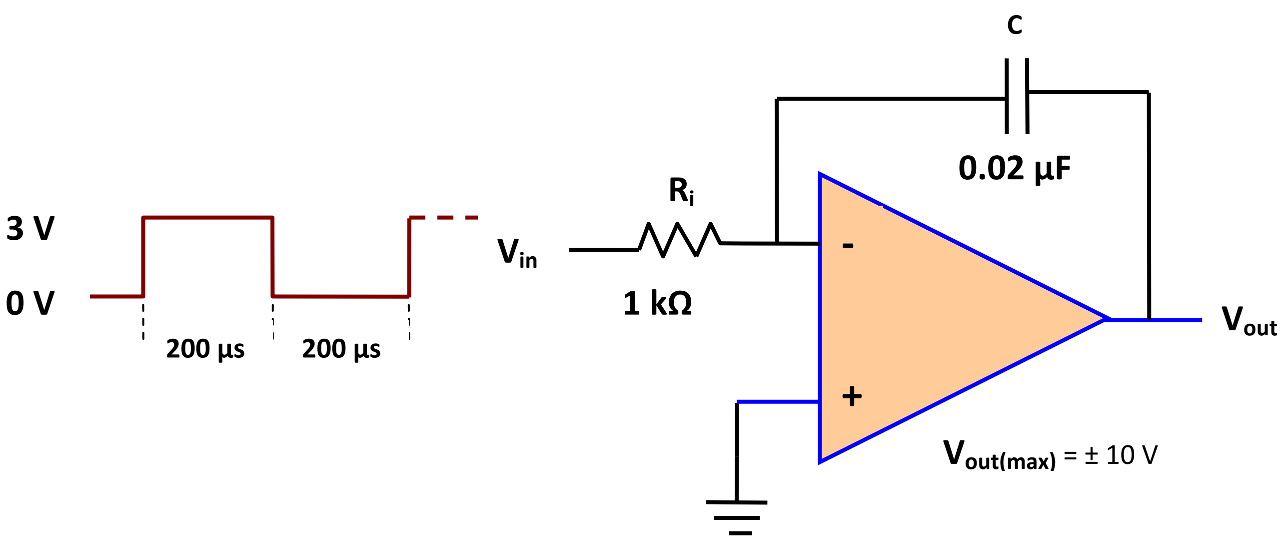
3- كيف يمكننا تصميم دائرة مجمع لحساب القيمة المتوسطة.

4- أوجد الجهد الناتج على مخرج دائرة المجمع التالية (الشكل 2- 24):



الشكل (2- 24)

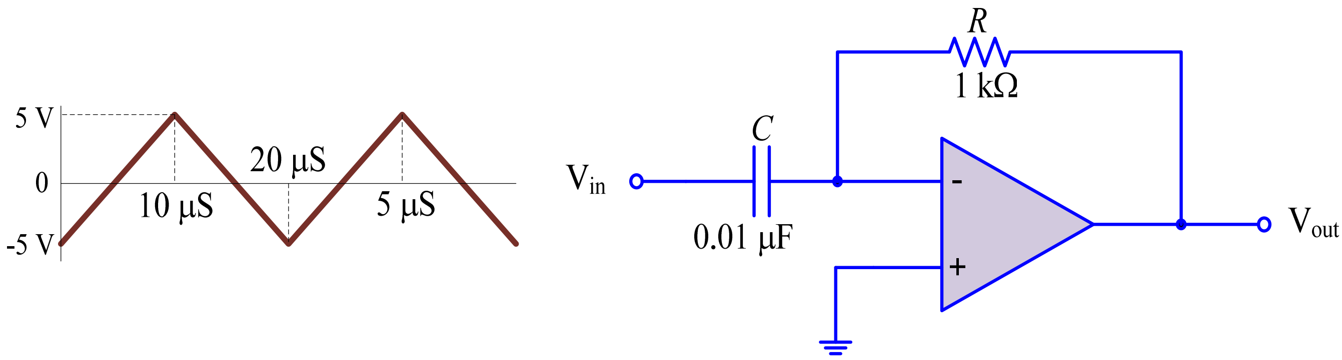
5- ارسم موجة الخرج لدائرة مكبر التكامل على الشكل (2- 25).



الشكل (2- 25)

6- ما هو الفرق الرئيس بين مكبر الاشتقاق ومكبر التكامل.

7- ارسم موجة الخرج لدائرة مكبر الاشتقاق التالية:



الشكل (2- 26)

المرشحات النشطة

3

الجدارة: القدرة على تحليل وتصميم المرشحات الكهربائية بأنواعها المختلفة.

الأهداف: بعد دراسة هذه الوحدة يكون المتدرب قادراً على:

- أن يتعرف المتدرب على مبدأ عمل المرشحات الخاملة والنشطة
- أن يتعرف المتدرب على مكونات المرشحات
- أن يتدرب المتدرب الاستجابة الترددية لأنواع المرشحات
- أن يتدرب المتدرب أنواع المرشحات وخصائصها الفنية
- أن يستطيع المتدرب على تحليل و تصميم أنواع مختلفة من المرشحات حسب التردد المطلوب

الوقت المتوقع للتدريب: 4 ساعات.

المرشحات النشطة

Active Filters

مقدمة

تستخدم المرشحات كدوائر كهربائية لتمرير إشارات بترددات معينة وتمنع مرور ترددات أخرى حيث يتم تصميم تلك المرشحات بناء على قيم الترددات المراد تمريرها أو منعها، وتسمى هذه الخاصية بانتقائية المرشح (Filter Selectivity). تتكون دوائر المرشحات العادية من المقاومة والمكثف والملف (غالباً ما يستخدم المكثف مع المقاومة) ويمكن أن تكون (RC, RL, or RLC). تسمى هذه المرشحات بالمرشحات الخاملة (Passive Filters). أما المرشحات النشطة (Active Filters) فتستخدم الترانزستور أو مكبر العمليات بالإضافة للمقاومة والمكثف والملف وذلك للحصول على تكبير (Gain) معين (تكبير الجهد). هناك أربعة أنواع رئيسة من المرشحات النشطة سوف نقوم بدراستها وهي:

- مرشح التردد المنخفض النشط Active Low-Pass Filter (LPF)
- مرشح التردد العالي النشط Active High-Pass Filter (HPF)
- مرشح التردد في نطاق معين Active Band-Pass Filters (BPF)
- مرشح منع نطاق معين Active Band-Stop Filters (BSF)

يعتمد أداء وعمل المرشح على عدد العناصر الداخلة في تكوين الدائرة (ونخص هنا المكثفات) والتي تحدد درجة المرشح (Filter Order). كلما زاد عدد المكثفات كلما ارتفعت درجة المكثف وتحسن أداؤه من حيث انتقائية الترددات المراد تمريرها أو منعها. تستخدم المرشحات الكهربائية الخاملة والنشطة في مختلف دوائر وأنظمة الاتصالات التماثلية والرقمية كذلك تستخدم في الأنظمة الالكترونية في مختلف التطبيقات.

سوف نقوم بدراسة الأنواع السابقة من المرشحات من حيث الاستجابة الترددية، والخصائص الفنية مع دراسة طرائق تحليل وتصميم تلك المرشحات.

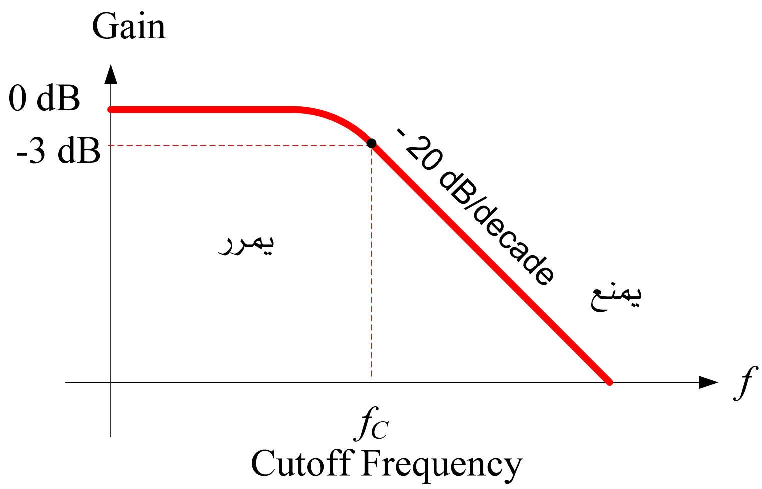
3- 1 مرشح التردد المنخفض النشط Active Low-Pass Filter (LPF)

يقوم مرشح التردد المنخفض بتمرير الترددات المنخفضة (من صفر لغاية تردد يطلق عليه تردد القطع Critical or Cutoff Frequency f_c) ويمنع مرور الترددات فوق تردد القطع. لتوضيح ذلك سنقوم برسم الاستجابة الترددية (Frequency Response) والتي هي عبارة عن رسم بياني يمثل كيف يتغير معامل التكبير مع تغير التردد (الشكل 3- 1). هناك طريقتان للرسم؛ إما باستخدام الوحدات العادية لمعامل التكبير (بالمرات) أو باستخدام وحدة الديسبل (**dB**) للتعبير عن عدد مرات معامل التكبير وفقاً للعلاقة التالية:

$$Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}},\ \ In\ decibel\, units: \qquad (3\text{-}1)$$
$$20\log\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right), [\,dB\,]$$

ملاحظة: في حالة التعامل مع القدرة على الدخل والخرج نضرب اللوغاريتم ب10 بدلاً من 20.

كما هو واضح من العلاقة (3- 1) يلزمنا استخدام اللوغاريتم العشري للتحويل لوحدة الديسبل. في هذه الحالة يجب استخدام مقياس خاص لتغير الترددات على المحور الأفقي وهو أن كل قيمة عشرة أضعاف ما قبلها والتي تسمى (Decade).



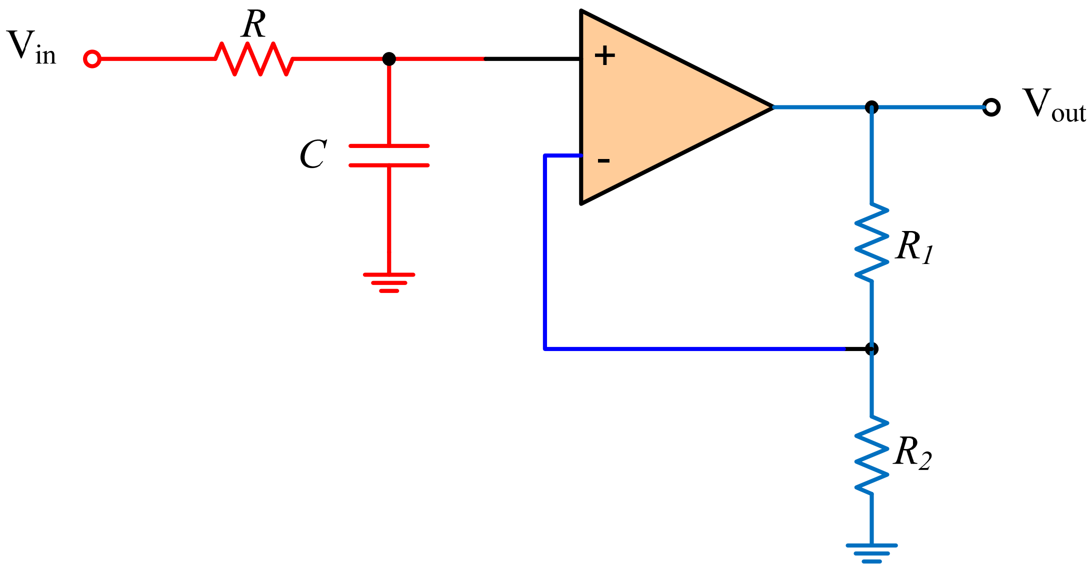
الشكل (3- 1) الاستجابة الترددية لمرشح التردد المنخفض النشط

يتم تحديد قيمة تردد القطع (f_c) من الرسم على مستوى أقل من القيمة القصوى للتكبير بمقدار 3dB مما يعادل هبوط قيمة التكبير إلى النصف بالوحدات العادية.

ملاحظة: في حالة التعامل مع الجهد أو التيار للحصول على 3dB- تنخفض القيمة القصوى بمعدل $\frac{1}{\sqrt{2}}$ وفي حالة التعامل مع القدرة (Power) تنخفض القيمة إلى النصف.

يوضح الشكل (3-2) دائرة مرشح تردد منخفض نشط من الدرجة الأولى ويتم تحديد تردد القطع حسب العلاقة التالية:

$$f_C = \frac{1}{2\pi RC} \qquad (3\text{-}2)$$



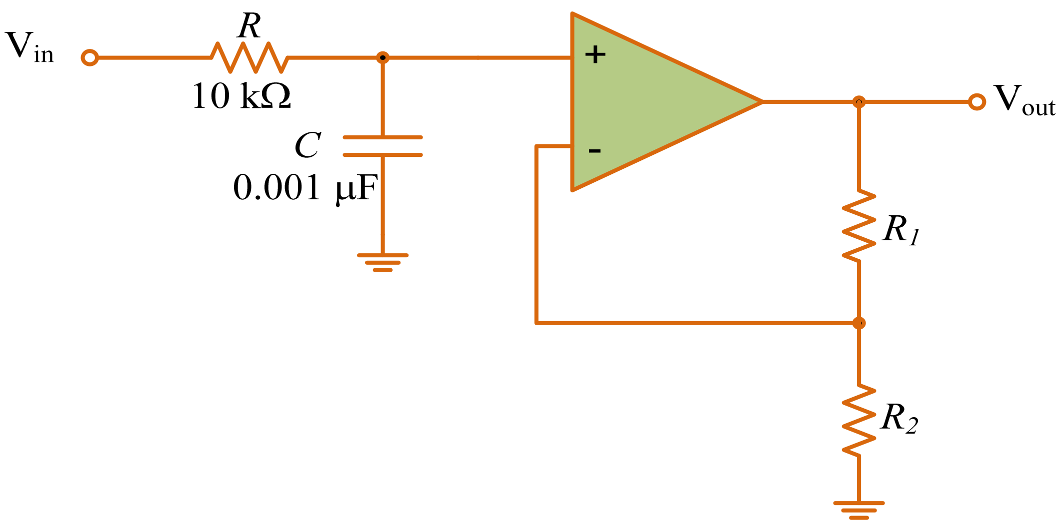
الشكل (3- 2) دائرة مرشح تردد منخفض نشط من الدرجة الأولى

المقاومة R والمكثف C تحددان انتقائية المرشح وقيمة تردد القطع وفقاً للعلاقة (3- 2)، بينما نتحكم بقيمة معامل تكبير الجهد من خلال المقاومات R_1 و R_1 في دائرة التغذية الراجعة للمكبر الغير عاكس.

مثال 3- 1:

أ- أرسم الاستجابة الترددية للمرشح أناه (الشكل 3- 3).

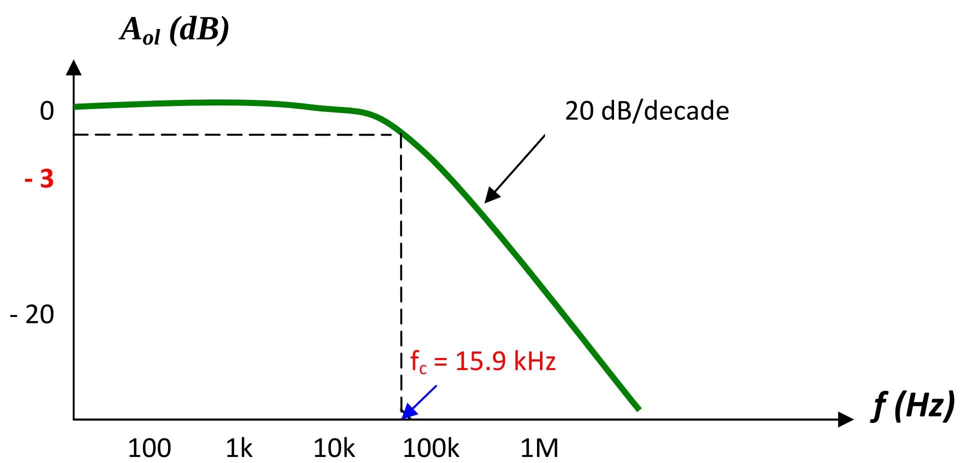
ب- احسب تردد القطع



الشكل (3-3)

الحل:

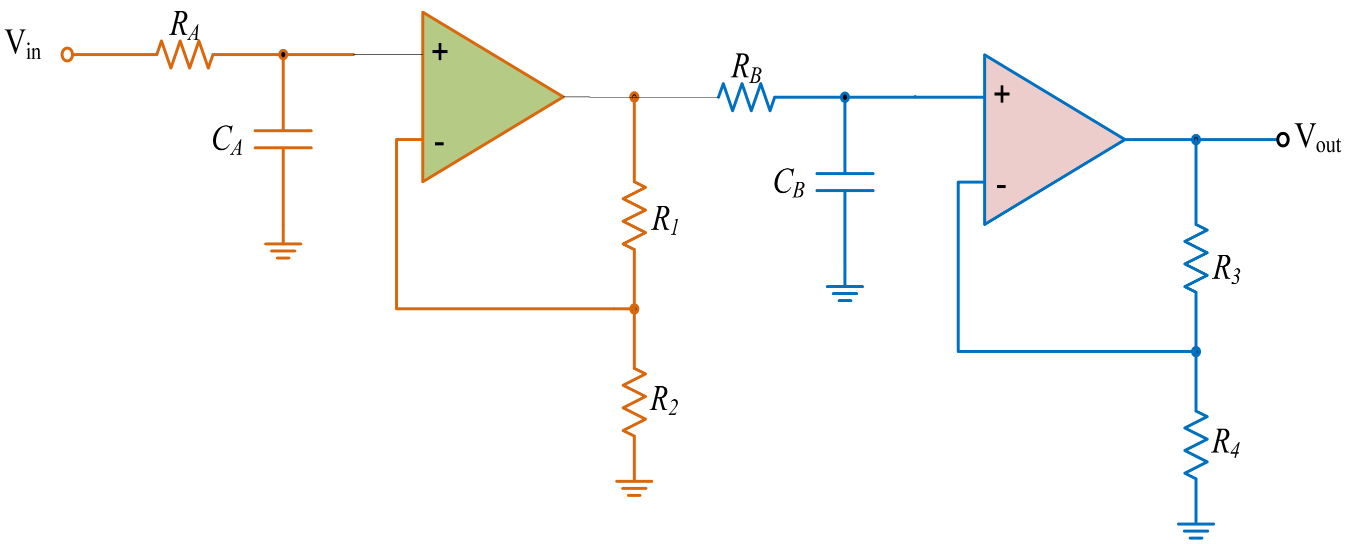
أ-



ب-

$$f_C = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(10\,\text{k})(0.001\,\mu\text{F})} = 15.9\,\text{kHz}$$

للحصول على مرشح تردد منخفض نشط من الدرجة الثانية نقوم بتوصيل دائرتين من الدرجة الأولى على التوالي وفقاً للشكل (3- 4).



الشكل (3- 4) مرشح تردد منخفض نشط من الدرجة الثانية

كلما أضفنا دائرة أساسية تزداد الدرجة بمقدار واحد. لحساب تردد القطع للدائرة من الدرجة الثانية نستخدم العلاقة التالية:

$$f_C = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_A R_B C_A C_B}} \qquad (3\text{-}3)$$

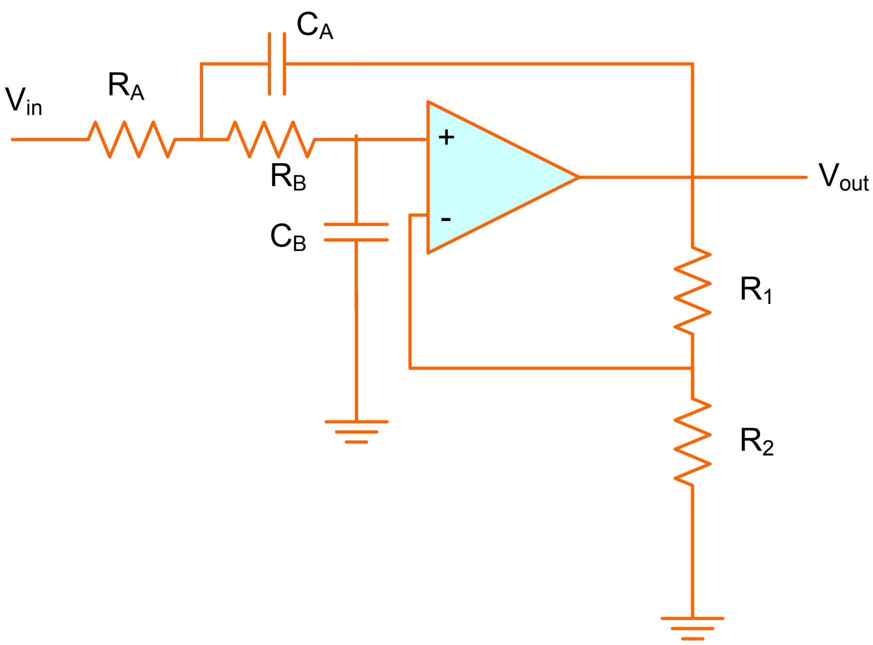
من أشهر دوائر المرشحات ذات الدرجة الثانية ما يسمى Sallen-Key Low-Pass Filter الموضحة على الشكل (3- 5). لحساب قيم المقاومات R_1 أو R_2 باستخدام نموذج بترورث (Butterworth) نستخدم الجدول التالي (3- 1). من الجدول وحسب درجة المرشح يمكننا معرفة القيم التالية:

- عدد الأقطاب (Number of Poles)
- هبوط المنحنى (Roll-off, dB/decade)
- معامل التخميد (Damping Factor)
- نسبة المقاومات R_1 إلى R_2 (R_1 / R_2)

جدول (3- 1) القيم المستخدمة في نموذج بترورث للمرشحات

ORDER	ROLL-OFF DB/DECADE	1ST STAGE			2ND STAGE			3RD STAGE		
		POLES	DF	R_1/R_2	POLES	DF	R_3/R_4	POLES	DF	R_5/R_6
1	−20	1	Optional							
2	−40	2	1.414	0.586						
3	−60	2	1.00	1	1	1.00	1			
4	−80	2	1.848	0.152	2	0.765	1.235			
5	−100	2	1.00	1	2	1.618	0.382	1	0.618	1.382
6	−120	2	1.932	0.068	2	1.414	0.586	2	0.518	1.482

للحصول على مرشح من الدرجة الرابعة نقوم بتوصيل دائرتين من الدرجة الثانية على التوالي وهكذا يمكننا زيادة درجة المرشح (لتحسين أدائه) بزيادة الدوائر الموصولة على التوالي.



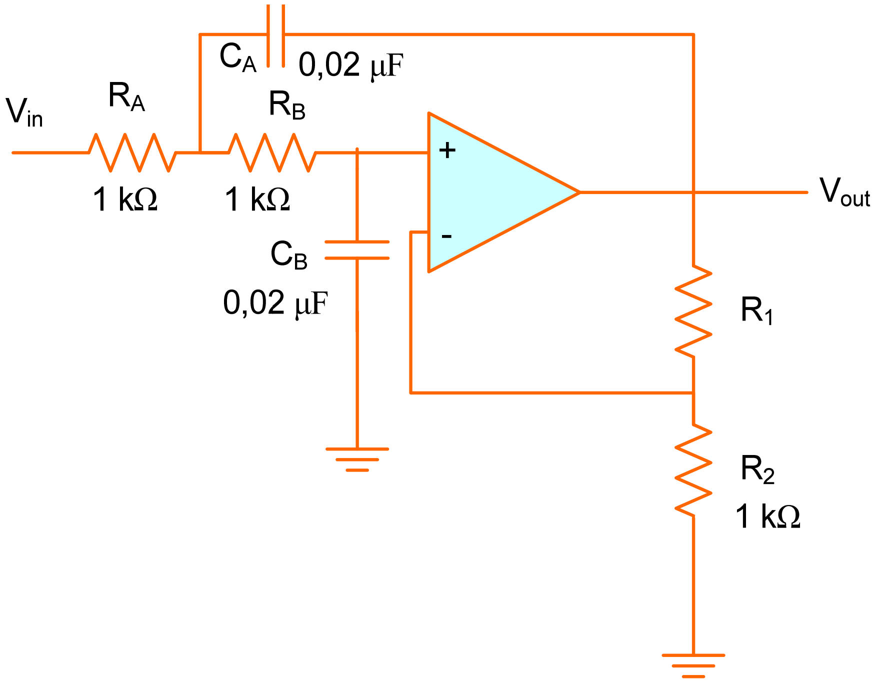
الشكل (3- 5) مرشح من الدرجة الثانية نوع Sallen-Key

يستخدم مرشح التردد المنخفض في مختلف المجالات وأهمها أنظمة الاتصالات التماثلية والرقمية، البث الإذاعي والتلفزيوني والأنظمة الالكترونية المختلفة.

مثال 3- 2:

أ- أوجد تردد القطع لدائرة المرشح التالية الشكل (3- 6).

ب- احسب قيمة المقاومة R_1 باستخدام الجدول 3- 1.



الشكل (3-6)

الحل:

أ- بما أن المقاومات متساوية والمكثفات متساوية فإن العلاقة (3- 3) تتبسط لتصبح:

$$f_C = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_A R_B C_A C_B}}$$

$$= \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi 1k\Omega \times 0.02\,\mu F} = 7.96\,kHz$$

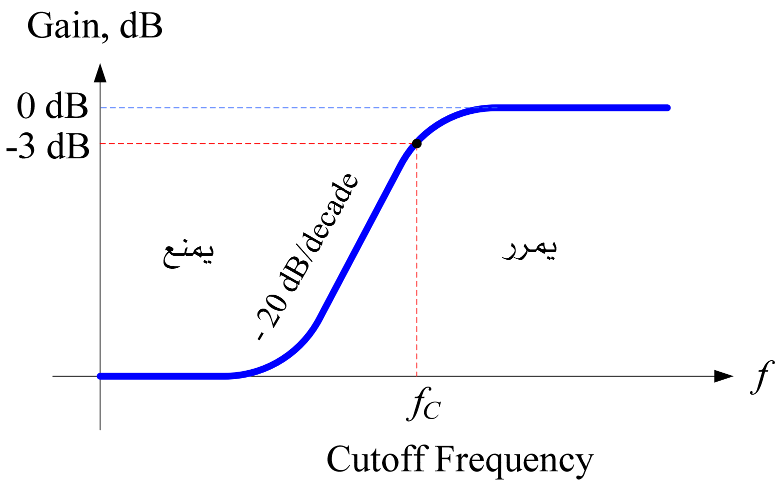
ب- لحساب قيمة R_1 نستخدم الجدول 3- 1

للمرشح من الدرجة الثانية نستخدم السطر الثاني من الجدول للمرحلة الأولى (First Stage)،

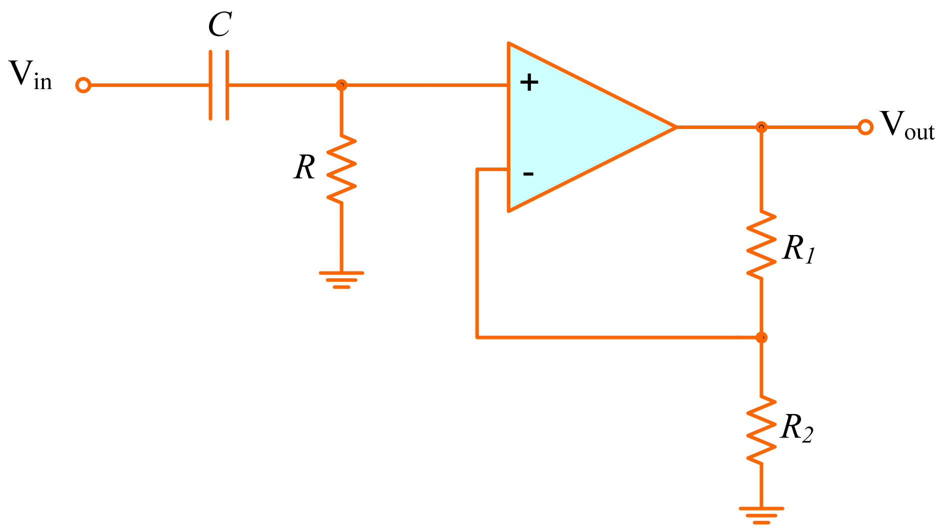
$$\frac{R_1}{R_2} = 0.586 \rightarrow R_1 = 0.586\,R_2 = 0.586 \times 1k\Omega = 586\,\Omega$$

3- 2 مرشح التردد العالي النشط Active High-Pass Filter (HPF) :

عبارة عن مرشح يمرر الترددات العالية فوق تردد القطع، ويمنع مرور الترددات المنخفضة دون تردد القطع كما في الشكل (3-7). في هذه الحالة في دائرة المرشح سوف يتم استبدال المقاومة والمكثف مكان بعضهما البعض.

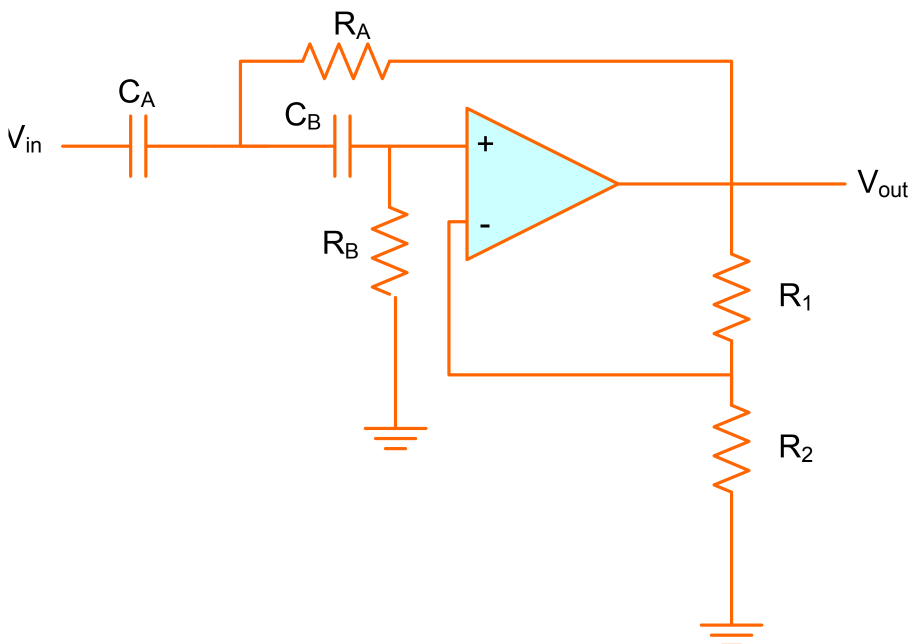


يوضح الشكل (3- 8) دائرة مرشح نشط من الدرجة الأولى.



الشكل (3- 8) دائرة مرشح نشط عالي التردد من الدرجة الأولى

للحصول على مرشح تردد عالٍ نشط من الدرجة الثانية نقوم بتوصيل دائرتين من الدرجة الأولى على التوالي. من أشهر دوائر المرشحات ذات الدرجة الثانية ما يسمى Sallen-Key High-Pass Filter الموضحة على الشكل (3- 9).



الشكل (3- 9) مرشح عالٍ التردد من الدرجة الثانية نوع Sallen-Key

مثال 3- 3

أوجد القيم اللازمة للحصول على مرشح نشط عالي التردد (الشكل 3- 9) ذي تردد قطع 10 kHz.

الحل:

للتبسيط، نختار قيمة مقاومة للمقاومات R_A ، R_B و R_1 أو R_2

$$R = R_A = R_B = R_2 = 3.3\,k\Omega$$

من العلاقة (3- 3) نقوم بحساب قيمة المكثف (نعتبر $C_A = C_B$)

$$C = C_A = C_B = \frac{1}{2\pi R f_c} = \frac{1}{2\pi(3.3\,k\Omega)\,(10\,kHz)} = 0.0048\,\mu F$$

بالرجوع للجدول (3- 1):

$$\frac{R_1}{R_2} = 0.586 \;\rightarrow\; R_1 = 0.586\,R_2 = 0.586 \times 3.3\,k\Omega = 1.93\,k\,\Omega$$

ملاحظة:

إذا ما اخترنا منذ بداية الحل $R_1 = 3.3\ k\Omega$ فإن R_2 يمكن إيجادها:

$$R_2 = \frac{R_1}{0.586} = \frac{3.3\,k\Omega}{0.586} = 5.63\,k\Omega$$

مع اختلاف القيم الناتجة للمقاومات لكن دائماً يبقى حاصل القسمة ثابتاً ($\frac{R_1}{R_2} = 0.586$).

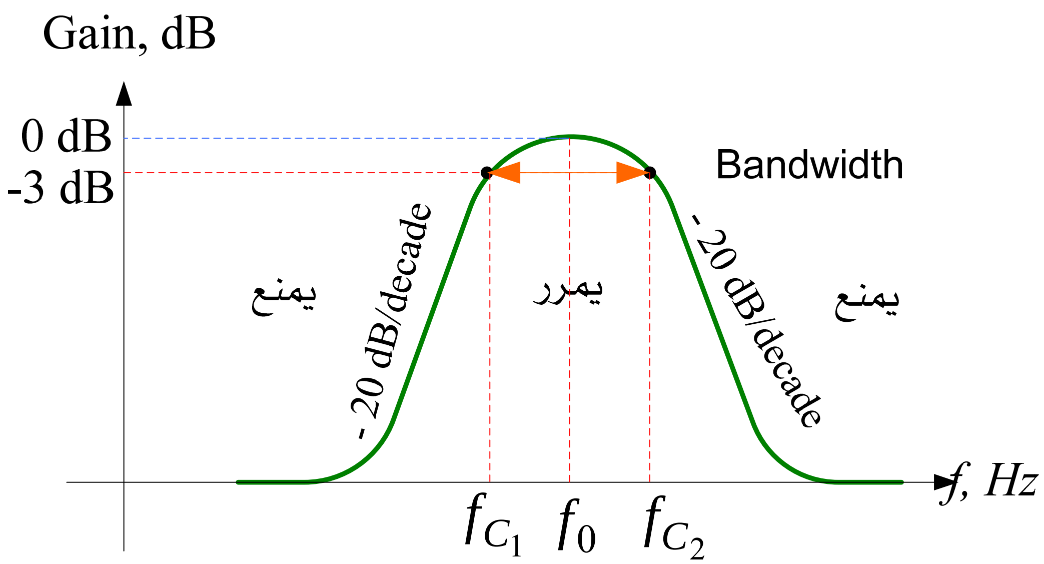
للحصول على مرشح تردد عالي نشط من الدرجة الرابعة نقوم بتوصيل دائرتين من الدرجة الثانية على التوالي وهكذا يمكننا زيادة درجة المرشح (لتحسين أدائه) بزيادة الدوائر الموصولة على التوالي.

يستخدم مرشح التردد العالي في مختلف المجالات وأهمها أنظمة الاتصالات التماثلية والرقمية، البث الإذاعي والتلفزيوني والأنظمة الالكترونية المختلفة.

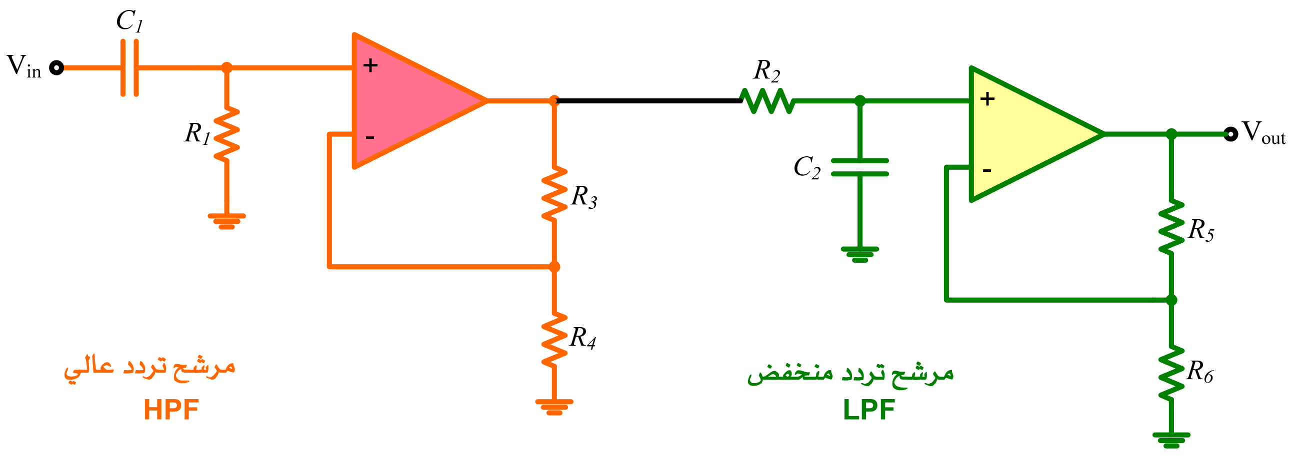
3-3 مرشح التردد في نطاق معين Active Band-Pass Filters (BPF):

يقوم مرشح التردد في نطاق محدد بتمرير ترددات محددة في نطاق معين محصور بين تردد القطع f_{C_1} و وتردد القطع f_{C_2} ويمنع مرور باقي الترددات كما في الشكل (3-10). يمكننا اعتبار هذا المرشح كدمج ما بين مرشح التردد المنخفض (تردد قطع f_{C_2}) ومرشح التردد العالي (تردد قطع f_{C_1}).

للحصول على مرشح التردد في نطاق معين نقوم بتوصيل مرشح تردد عالٍ يتبعه على التوالي مرشح تردد منخفض كما هو موضح على الشكل (3- 11)، حيث إن مرشح التردد العالي يحدد تردد القطع الأول f_{C_1} و مرشح التردد المنخفض يحدد التردد الثاني f_{C_2} .

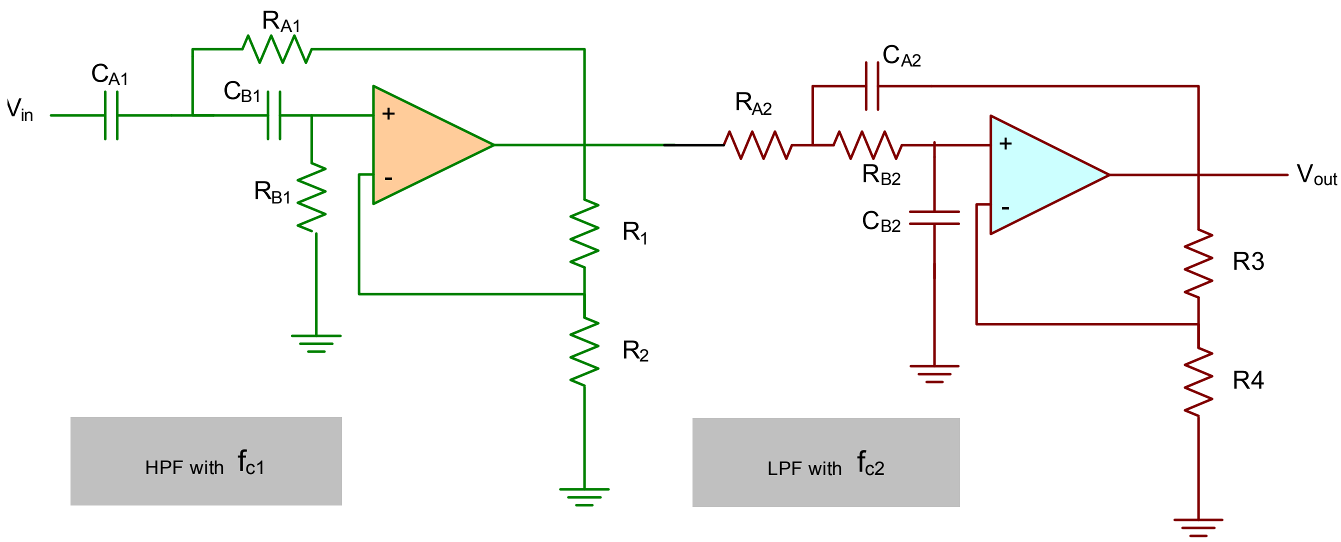


الشكل (3- 10) الاستجابة الترددية لمرشح التردد في نطاق معين



الشكل (3- 11) مرشح التردد في نطاق معين

للحصول على مرشح التردد في نطاق معين من الدرجة الثانية نوع Sallen-Key انظر الشكل (3-12).



الشكل (3- 11) مرشح التردد في نطاق معين من الدرجة الثانية من نوع Sallen-Key

لحساب ترددات القطع الأول والثاني وتردد الوسط f_0 نستخدم العلاقات التالية:

$$f_{C1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_{A1}\,R_{B1}C_{A1}\,C_{B1}}}$$ (3-4)

$$f_{C2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_{A2}\,R_{B2}C_{A2}\,C_{B2}}}$$ (3-5)

$$f_0 = \sqrt{f_{c1}\ f_{c2}}$$ (3-6)

لحساب عرض النطاق الترددي (*BW*) لمرشح التردد في نطاق معين:

$$BW = f_{c2} - f_{c1}$$ (3-7)

لحساب معامل النوعية (*Q - Factor*) لمرشح التردد في نطاق معين:

$$Q = \frac{f_0}{BW}$$ (3-8)

كلما صغر عرض النطاق الترددي كلما تحسنت انتقائية المرشح (Selectivity)، بمعنى آخر كلما كبرت قيمة معامل النوعية للمرشح كلما كان أفضل في الأداء من ناحية الانتقائية للترددات المسموح بمرورها. بناء على ما سبق، تقسم المرشحات إلى نوعين:

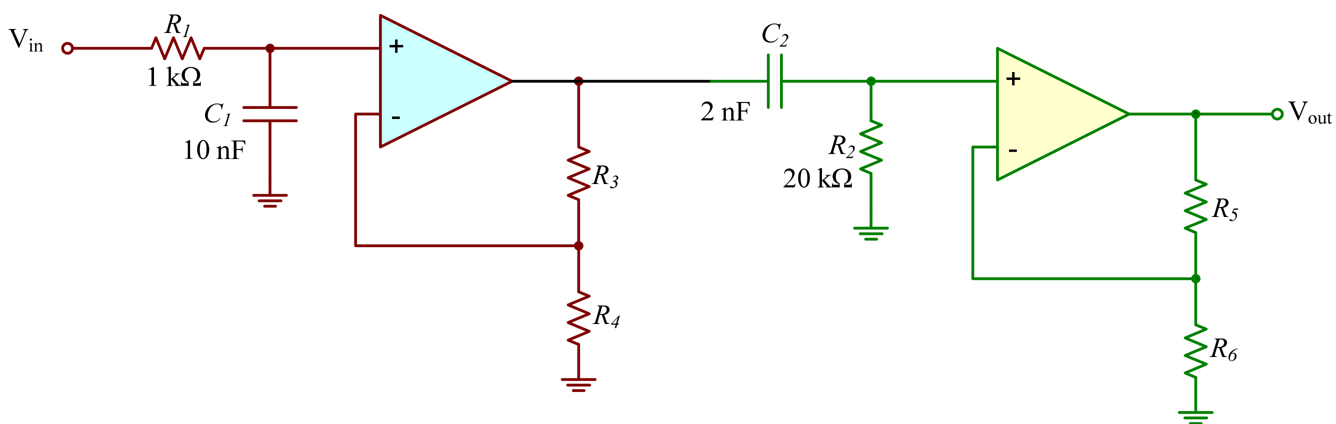
- المرشحات ذات عرض النطاق الضيق (Narrow-Band Band-Pass Filter) ويكون معامل النوعية لها ($Q > 10$).
- المرشحات ذات عرض النطاق الواسع (Wide-Band Band-Pass Filter) ويكون معامل النوعية لها ($Q < 10$).

لمزيد من الإيضاح انظر المثال التالي:

مثال 3- 4

أ- أوجد ترددات القطع وتردد الوسط لمرشح تردد نطاق محدد الموضح بالشكل أدناه:

ب- أوجد معامل النوعية Q-Factor



الشكل (3- 12)

الحل:

أ-

$$f_{C_1}=\frac{1}{2\pi R_1C_1}=\frac{1}{2\pi(1\,\text{k})(10\,\text{nF})}=15.9\,\text{kHz}$$

$$f_{C_2}=\frac{1}{2\pi R_2C_2}=\frac{1}{2\pi(20\,\text{k})(2\,\text{nF})}=3.98\,\text{kHz}$$

$$f_0=\sqrt{f_{C_1}\,f_{C_2}}=\sqrt{(15.9\,\text{k})(3.98\,\text{k})}=7.95\,\text{kHz}$$

ب- لإيجاد معامل النوعية نحسب أولاً عرض النطاق الترددي ومن ثم باستخدام العلاقة (3- 8) نجد المطلوب.

$$BW=f_{c2}-f_{c1}=15.9\,kHz-3.98\,kHz=11.92\,kHz$$

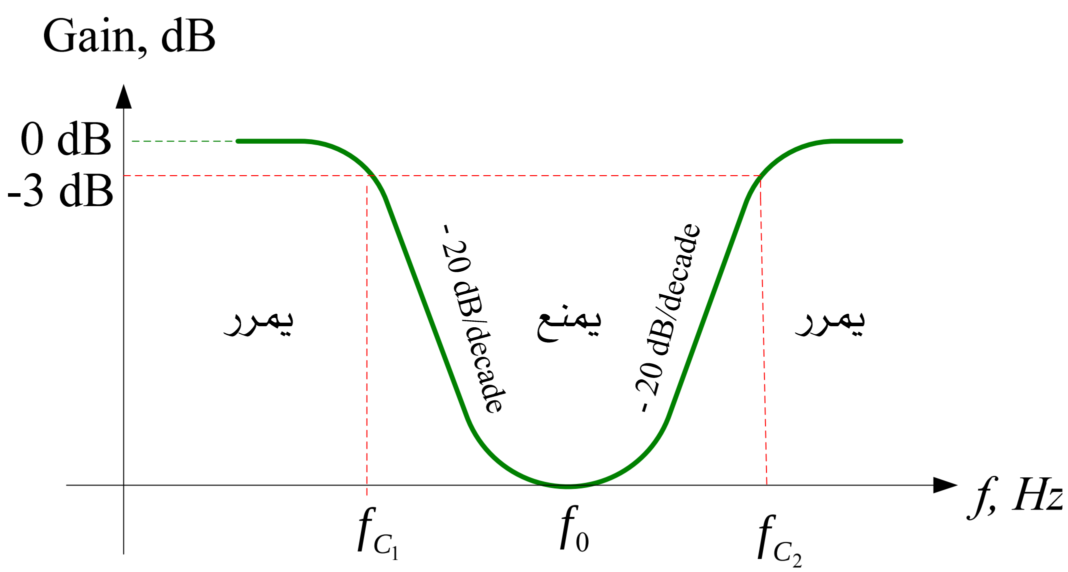
$$Q=\frac{f_0}{BW}=\frac{7.95\,kHz}{11.92\,kHz}=0.666$$

يتضح من النتيجة الأخيرة بأن المرشح من النوع ذي عرض النطاق الواسع ويعتبر عملياً غير جيد من ناحية قدرته الانتقائية على تمرير الترددات.

يستخدم مرشح التردد في نطاق معين في مختلف المجالات وأهمها أنظمة الاتصالات التماثلية والرقمية، البث الإذاعي والتلفزيوني والأنظمة الالكترونية المختلفة.

3- 4 مرشح منع نطاق معين Active Band Stop Filter :

مرشح منع نطاق معين يقوم بمنع مرور ترددات محددة في نطاق معين محصور بين تردد القطع f_{C_1} و تردد القطع f_{C_2} ويمرر باقي الترددات كمل في الشكل (3-13).



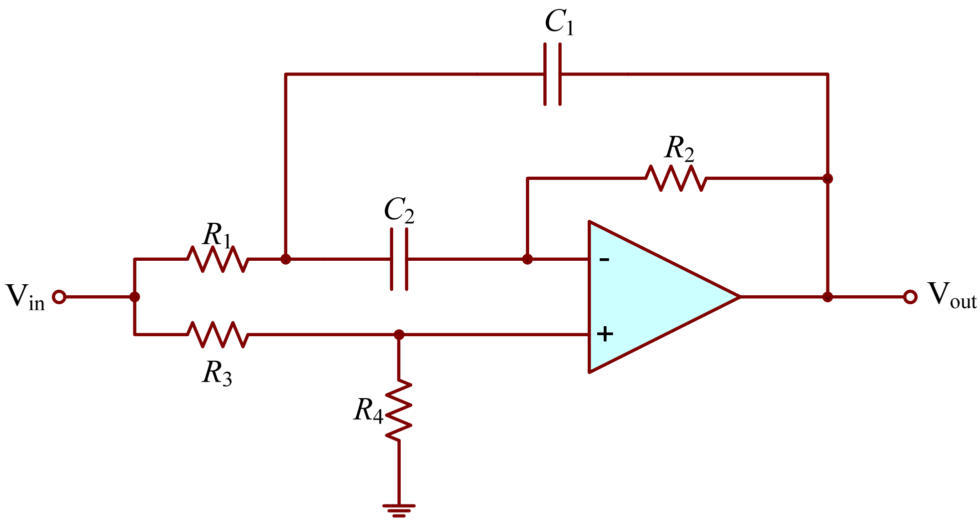
الشكل (3- 13) الاستجابة الترددية لمرشح منع نطاق معين

يوضح الشكل (3- 14) أدناه دائرة مرشح منع نطاق معين. إذا ما أردنا منع تردد بعينه (مثلاً 60 Hz وهو تردد الكهرباء المنزلية لمنع التشويش على الأجهزة الالكترونية) يجب مراعاة أن تكون قيمة ترددي القطع متساوية ($f_{c1} = f_{c2}$) ولتحقيق ذلك يجب مراعاة الشرط التالي:

$$R_1 = R_2$$
$$C_1 = C_2$$

وفي هذه الحالة تصبح قيمة تردد الوسط f_0 :

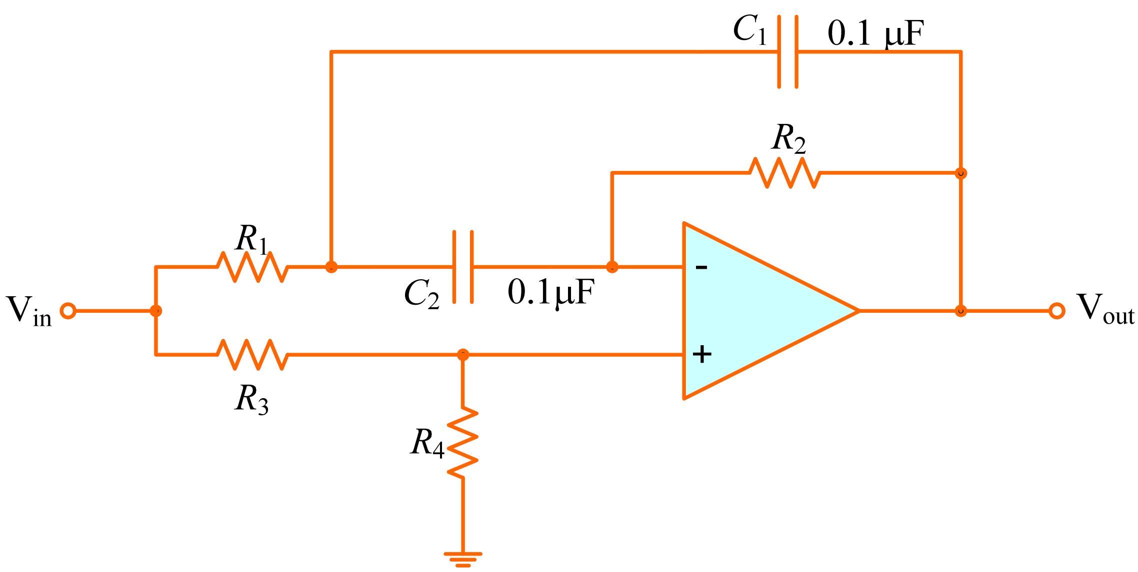
$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \qquad (3\text{-}9)$$



الشكل (3- 14) مرشح منع تردد معين

مثال 3- 5

ما هي قيمة R_1 و R_2 اللازمة لمنع التردد 100 Hz في الدائرة التالية:



الشكل (3- 15)

الحل:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$R = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 100 \times 0.1\,\mu} = 15.92\,\mathrm{k\Omega}$$

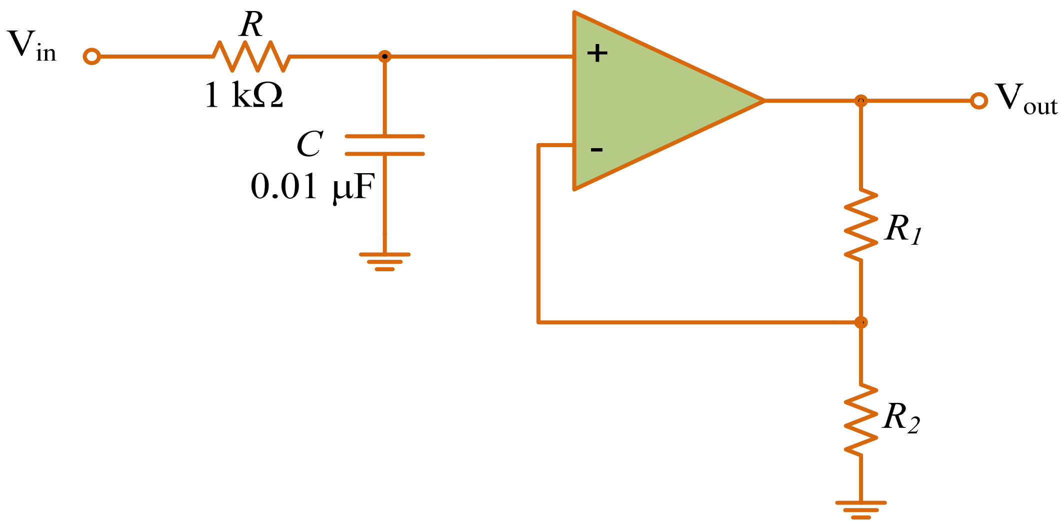
أسئلة وتمارين

1- ما هو المقصود بالمرشحات الخاملة؟

2- ما هو المقصود بالمرشحات النشطة؟

3- أ- أرسم الاستجابة الترددية للمرشح أناه (الشكل 3- 16)؟

ب- احسب تردد القطع؟



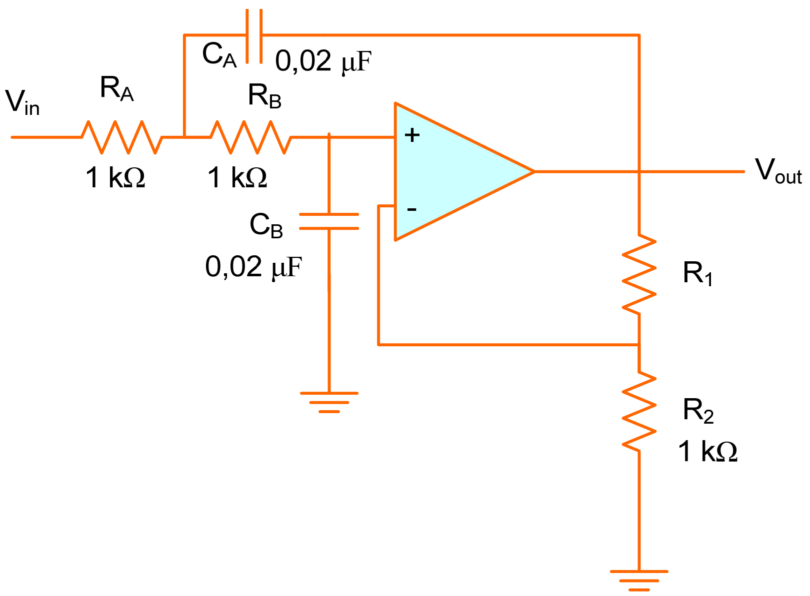
الشكل (3- 16)

4- ما هي وظيفة مكبر العمليات في دائرة المرشح النشط وهل يمكننا استبدالها بالترانزستور.

5- لديك دائرة مرشح على الشكل (3- 17).

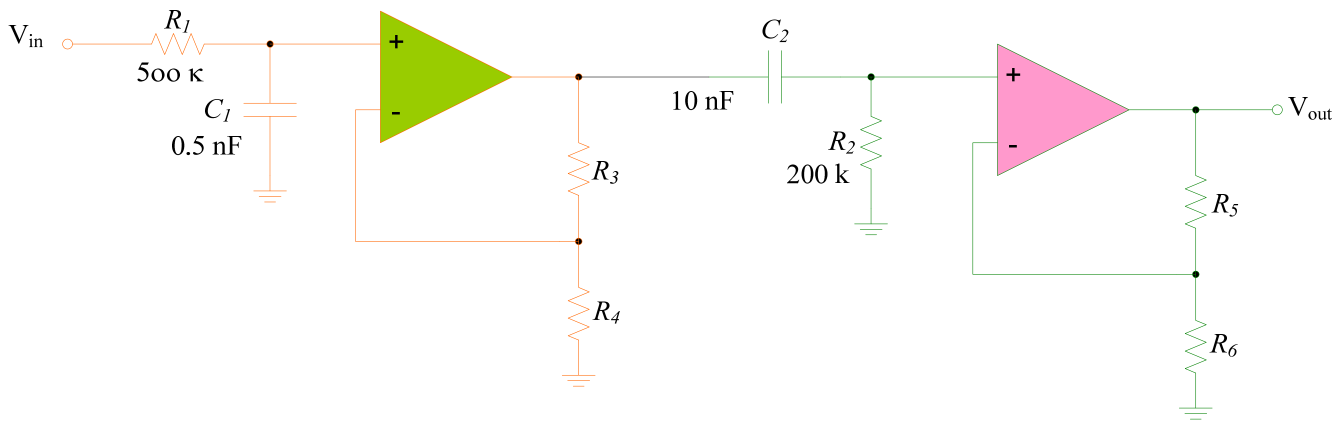
أ- أوجد تردد القطع.

ب- احسب قيمة المقاومة R_1 باستخدام الجدول 3- 1.



الشكل (3- 17)

6- لديك مرشح موضح على الشكل أدناه:



الشكل (3- 18)

أ- ما نوع المرشح؟

ب- احسب ترددي القطع للمرشح.

جـ- ما وظيفة المقاومات R_3 و R_4؟

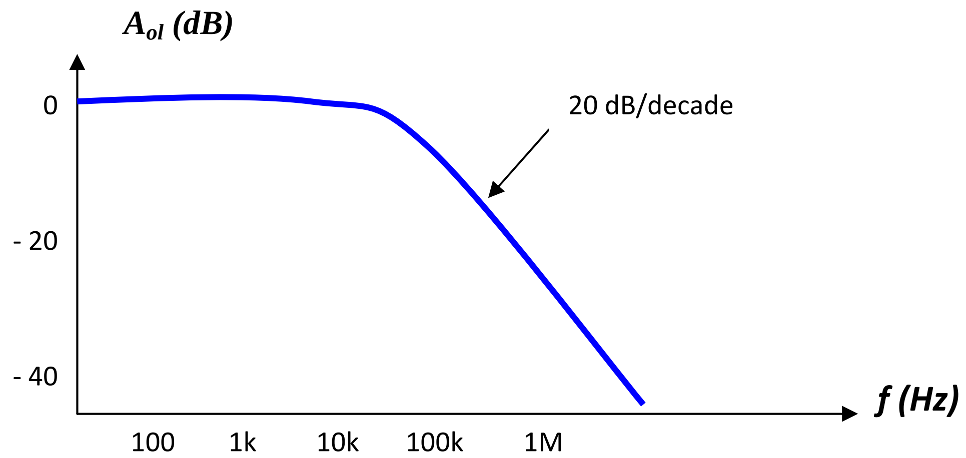
د- ماذا يحصل لتردد القطع لو غيرنا قيمة المكثف C_1 إلى 10 μF

7- لديك الاستجابة الترددية لمرشح على الشكل (3- 19) أوجد :

أ- نوع المرشح.

ب- درجة المرشح.

جـ- تردد القطع f_c.



الشكل (3- 19)

8- صمم مرشحاً عالٍ التردد من نوع سالين- كي للعمل على تردد قاطع 50 kHz.

9- صمم مرشح منخفض التردد من نوع سالين- كي للعمل على تردد قاطع 30 kHz.

10- أرسم دائرة مرشح تردد منخفض من الدرجة الرابعة من نوع سالين- كي.

11- بالرجوع للسؤال العاشر أوجد قيم المكثفات اللازمة للحصول على تردد قطع 2680 Hz على اعتبار أن جميع المقاومات متساوية القيمة وتساوي 1800 Ω.

مولدات الذبذبات

4

الجدارة: القدرة على تحليل و تصميم مولدات الذبذبات للإشارات الجيبية وغير الجيبية.

الأهداف: بعد دراسة هذه الوحدة يكون المتدرب قادراً على:

- أن يتعرف المتدرب على مبدأ عمل مولدات الذبذبات
- أن يحلل المتدرب ويصميم دوائر مولدات الإشارات الجيبية
- أن يحلل ويصميم دوائر مولدات الإشارات غير الجيبية

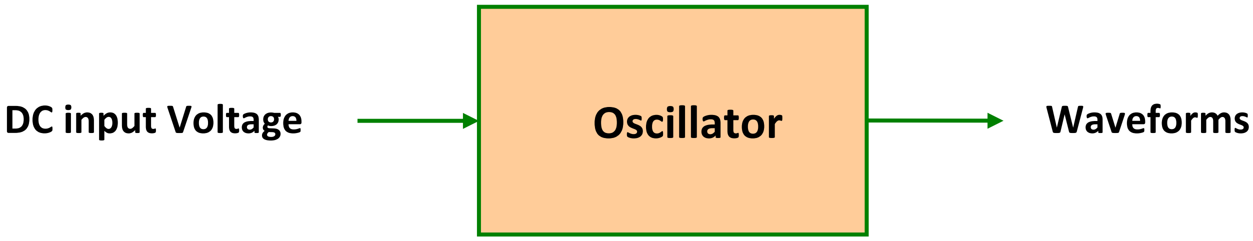
الوقت المتوقع للتدريب: 4 ساعات.

مولدات الذبذبات

Oscillators

مقدمة

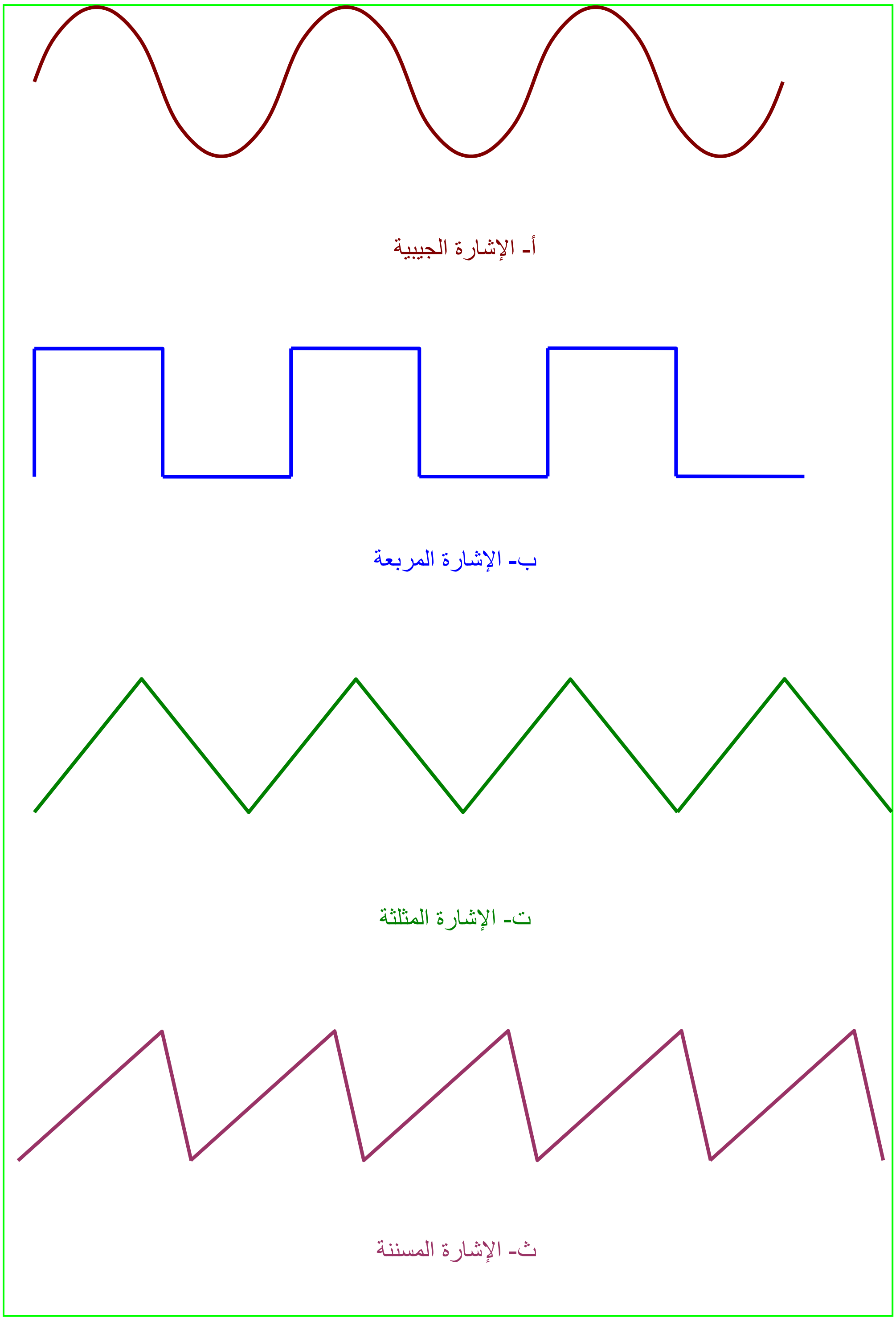
دوائر توليد الذبذبات أو (المذبذبات) عبارة عن دوائر الكترونية تقوم بتوليد إشارات على مخرجها تعيد نفسها بشكل دوري (Periodic) بدون اشتراط وجود إشارات على مدخلها (يكفي وجود جهد مستمر dc على المدخل الشكل 4- 1). هنالك دوائر مختلفة تتيح لنا الحصول على أشكال مختلفة من الإشارات (الشكل 4- 2). إن أهم أشكال الإشارات التي نتعامل معها في أنظمة الالكترونيات والاتصالات:



الشكل (4- 1) مبدأ عمل المذبذب

- الإشارة الجيبية Sine wave.
- الإشارة المربعة Square Wave .
- الإشارة المثلثة Triangular wave.
- الإشارة المسننة Sawtooth wave.

تستخدم المذبذبات في مختلف أنظمة الاتصالات التماثلية والرقمية، وأجهزة الحاسب، والأنظمة الالكترونية والأجهزة المستخدمة في المعامل.



أ- الإشارة الجيبية

ب- الإشارة المربعة

ت- الإشارة المثلثة

ث- الإشارة المسننة

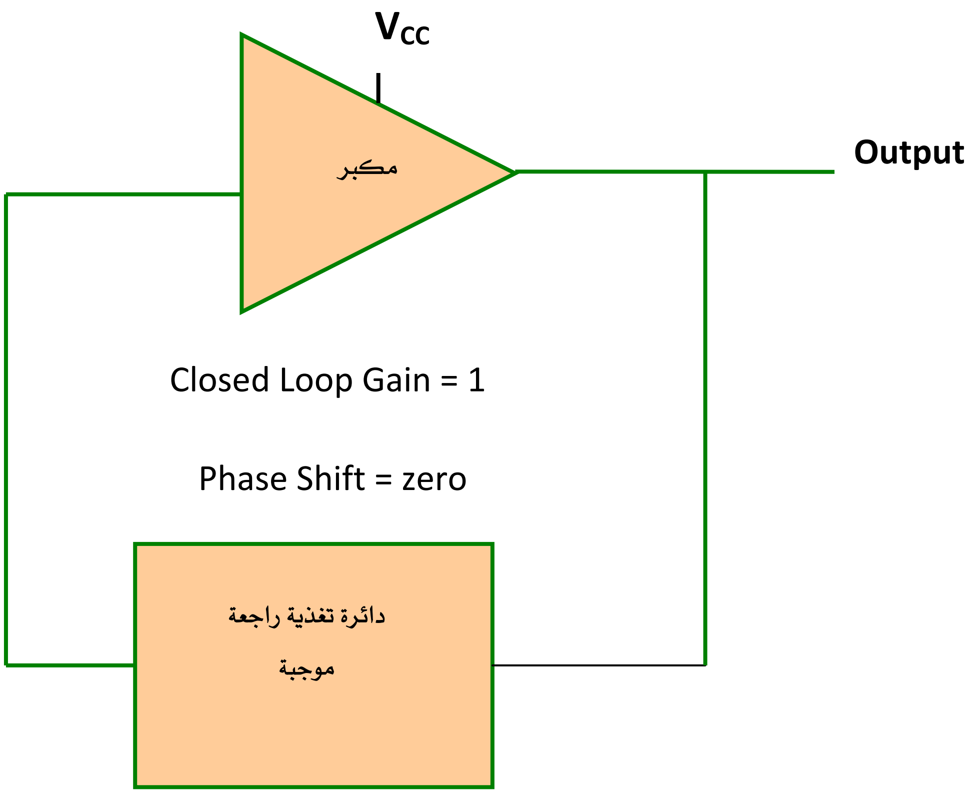
الشكل (4- 2) الأشكال المختلفة للإشارات

تنقسم المذبذبات بشكل عام إلى مجموعتين:

- مذبذبات التغذية الراجعة Feedback Oscillators.
- المذبذبات غير الجيبية Relaxation Oscillators .

4- 1 مذبذبات التغذية الراجعة Feedback Oscillators.

تعتمد مذبذبات التغذية الراجعة في عملها مبدأ التغذية العكسية الموجبة (Positive Feedback) والتي تتضمن إرجاع جزء من إشارة الخرج إلى مدخل المذبذب بطريقة تجعل منه يغذي نفسه بنفسه. يتكون هذا النوع من المذبذبات من مكبر (ترانزستور أو مكبر عمليات) للحصول على التكبير المطلوب (Gain) ومن دائرة التغذية الراجعة الموجبة للحصول على فرق زاوية الطور المطلوب (Phase Shift) و توهين الإشارة (Attenuation) وفقاً للشكل (4- 3).



الشكل (4- 3) مذبذبات التغذية الراجعة

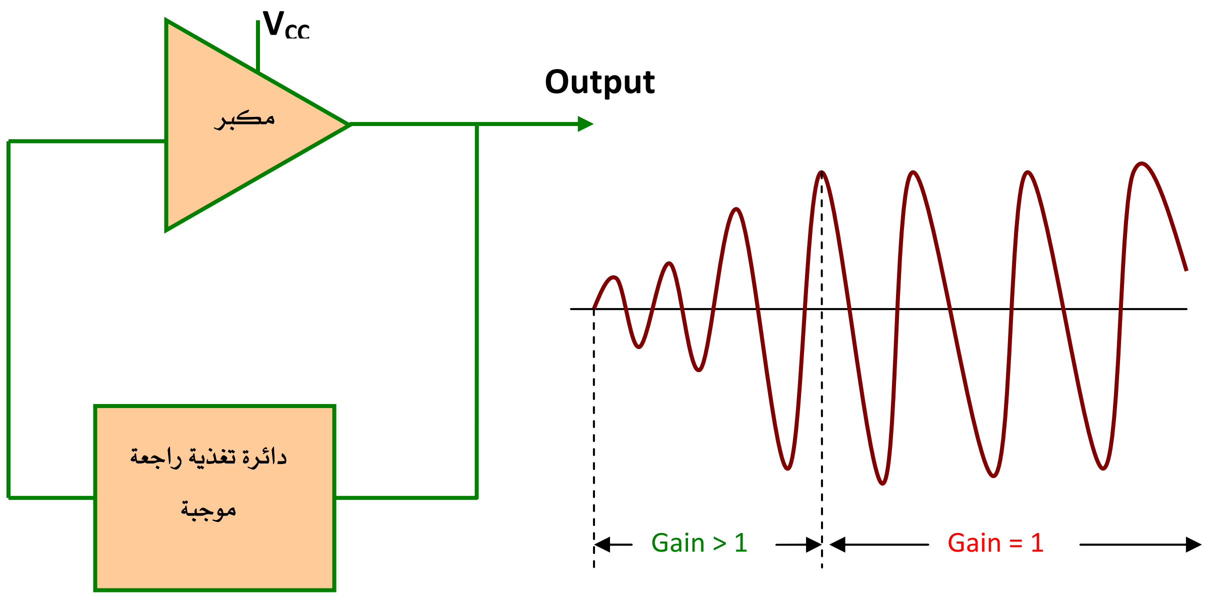
يستخدم هذا النوع من المذبذبات لتوليد الإشارات الجيبية والتي سنتناولها لاحقاً في الشرح.

هناك شرطان لعمل هذا المذبذب:

1. يجب أن يكون الفرق في زاوية الطور بين الدخل والخرج صفراً.
2. أن يكون الكسب الكلي للجهد ضمن المسار المغلق مساوياً للوحدة.

بداية التشغيل Start-Up Condition:

كما أوضحنا سابقاً من شروط عمل المذبذب، يجب أن يكون الكسب الكلي للجهد ضمن المسار المغلق مساوياً للوحدة لكن في بداية لحظة التشغيل يجب أن يكون معامل التكبير للجهد في دائرة التغذية الراجعة أكبر من واحد لتبدأ الإشارة بالظهور على المخرج وحتى تستقر على المستوى المطلوب عندها يرجع معامل التكبير إلى قيمة الوحدة كما هو موضح على الشكل (4- 4).



الشكل (4- 4) بداية التشغيل للمذبذب

4- 1- 1 المذبذبات مع دائرة RC للتغذية الراجعة Oscillators with RC Feedback Circuits

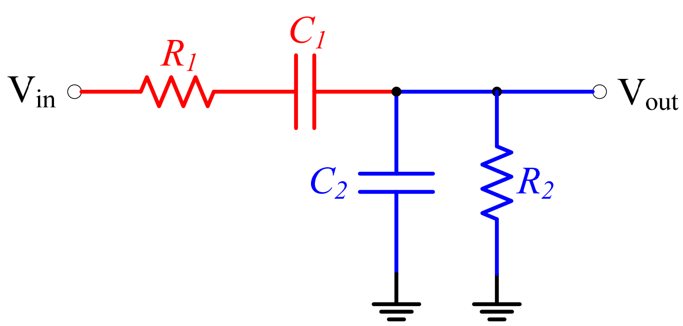
سوف نتعرف في هذا الجزء على ثلاث دوائر للمذبذب والتي تستخدم للحصول على مذبذبات تعمل على ترددات لغاية 1 MHz. إن استخدام دوائر RC ضروري لسببين: الأول للحصول على فرق الطور المطلوب لتوليد الذبذبات والثاني للحصول على مرشح رنين (Resonance Filter) على تردد رنين بقيمة التردد المراد توليده من دائرة المذبذب.

- مذبذب قنطرة واين Wien-Bridge Oscillator
- مذبذب فرق الطور Phase-Shift Oscillator
- مذبذب توين Twin-T Oscillator

وسوف نقوم بشرح النوعين الأول والثاني لأهميتهما.

4- 1- 1- 1 مذبذب قنطرة واين Wien-Bridge Oscillator:

يستخدم هذا المذبذب لتوليد الموجة الجيبية باستخدام دوائر *RC*. إن ما يميز هذا النوع هو دائرتا التقديم والتأخير (Lead and Lag Circuits) كما هو موضح على الشكل (4-5). يقوم كل من R_1 و C_1 بدور دائرة التأخير (Lag Circuit) و كل من R_2 و C_2 بدور دائرة التقدم (Lead Circuit).



الشكل (4-5) دائرة مذبذب قنطرة واين

يمكننا تحديد تردد التذبذب أو الرنين (Resonance) بالعلاقة التالية:

$$f_r = \frac{1}{2\pi RC} \qquad (4-1)$$

حيث إن قيم المقاومات متساوية وكذلك المكثفات. عند قيمة تردد الرنين يكون فرق زاوية الطور بين الدخل والخرج مساوياً للصفر. وهذا هو الشرط الأول لحدوث التذبذب. ولكن عند هذا التردد، فإن نسبة جهد الخرج إلى جهد الدخل هي:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{3} \qquad (4-2)$$

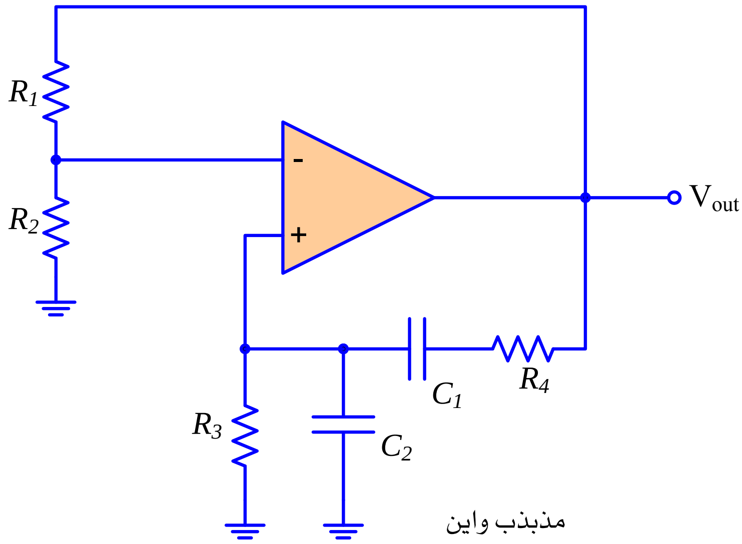
ولتحقيق الشرط الثاني للتذبذب، وهو أن الكسب مساوٍ للواحد، فيجب أن نضرب النسبة في (3). حيث إن:

$$A_{CL} = \frac{V_{out}}{V_{in}}(3) = \frac{1}{3}(3) = 1 \qquad (4-3)$$

لتحقيق ذلك نقوم بإضافة مكبر غير عاكس له معامل تكبير يساوي 3 كما في الشكل (4-6).

إن وظيفة المقاومات R_1 و R_2 هي ضبط قيمة معامل التكبير ويجب أن تكون قيم المقاومات R_1 و R_2 كالتالي:

$$R_1 = 2R_2 \qquad (4-4)$$

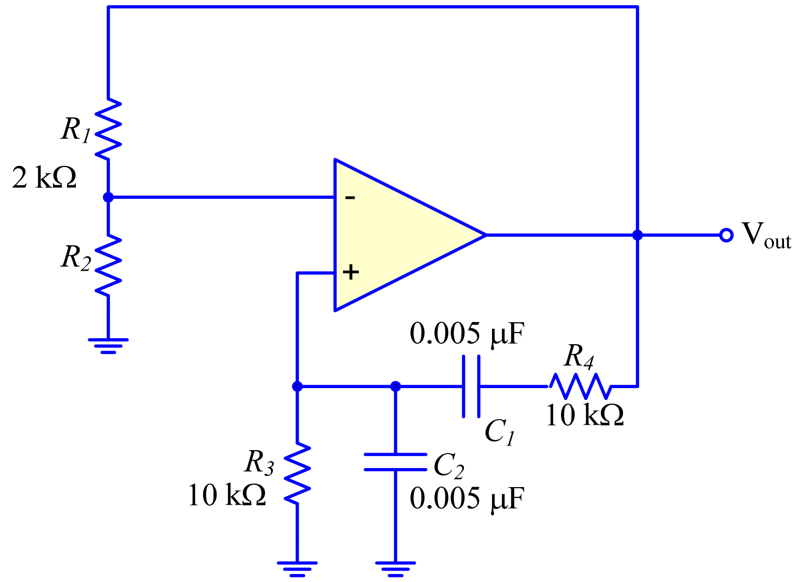


الشكل (4-6) دائرة مذبذب قنطرة واين

مثال (4- 1) :

أ- احسب تردد الرنين لمذبذب واين على الشكل (4- 7).

ب- احسب قيمة المقاومة R_2.



الشكل (4- 7)

الحل:

أ- باستخدام العلاقة (4- 1):

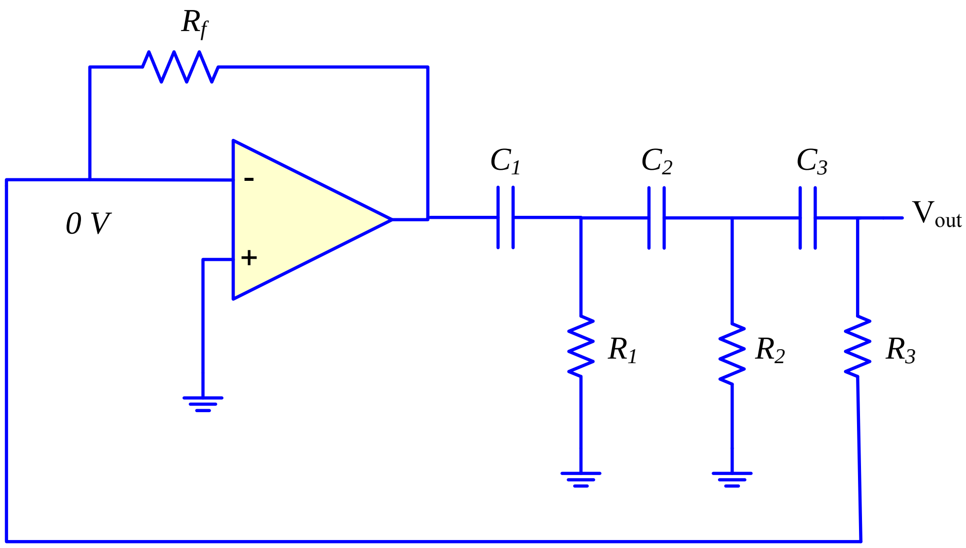
$$f_r = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(10\,\text{k})(0.005\,\mu\text{F})} = 3.184\,\text{kHz}$$

ب- باستخدام العلاقة (4- 4):

$$R_1 = 2R_2 = 2\times 2\,k\Omega = 4\,k\Omega$$

4- 1- 1- 2 مذبذب فرق الطور Phase-Shift Oscillator:

في هذا النوع من المذبذبات نستخدم ثلاث دوائر RC في مسار التغذية الراجعة (الشكل 4- 8) حيث تقوم كل دائرة من دوائر RC بإحداث فرق في زاوية الطور يقارب 90° . يحدث التذبذب على تردد محدد عندما يصبح فرق الطور الإجمالي للثلاث دوائر يساوي 180° ، لتحقيق شرط التذبذب (صفر درجة) نحصل من مكبر العمليات العاكس على مما 180° مما يعطينا ما مجموعه 360° وهو ما يعادل الصفر في مسار التغذية الراجعة.



الشكل (4- 8) مذبذب فرق الطور.

يمكننا معرفة التوهين (Attenuation) في مسار التغذية الراجعة من خلال العلاقة:

$$B = \frac{1}{29} \qquad (4-5)$$

لذلك يجب أن يكون معامل التكبير لمكبر العمليات لا يقل عن 29 لتحقيق شرط التذبذب والذي يمكننا التحكم به من خلال المقاومات Rf و R_3.

يمكننا تحديد تردد التذبذب أو الرنين (Resonance) بالعلاقة التالية:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{6RC}} \qquad (4-6)$$

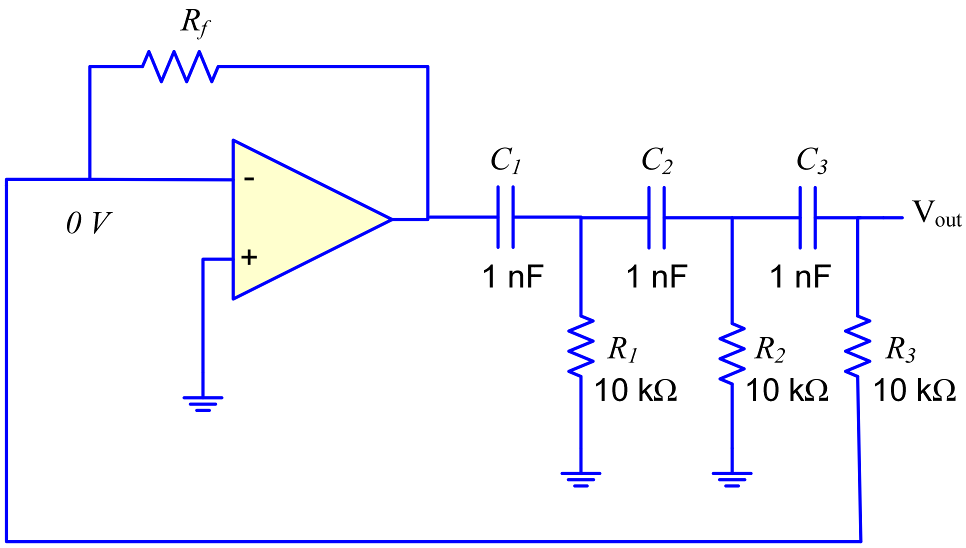
حيث إن:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R \quad and \quad C_1 = C_2 = C_3 = C$$

مثال 4- 2 :

أ- احسب قيمة Rf اللازمة لعمل الدائرة التالية كمذبذب.

ب- أوجد تردد الرنين للدائرة.



الشكل (4- 9)

الحل:

أ- وفقاً للعلاقة (4- 5) يجب أن يكون معامل التكبير يساوي 29 ، كما هو معلوم من العلاقة (1- 5) فإن معامل التكبير لمكبر العمليات العاكس:

$$A_{CL(I)} = -\frac{R_f}{R_i}$$

$$29 = \frac{R_f}{R_3}$$

$$R_f = 29\,R_3 = 29 \times 10\,k\Omega = 290\,k\Omega$$

ب- باستخدام العلاقة(4- 6):

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{6RC}}$$

$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{6\times 10\,k\Omega \times 1\,nF}} = 6.5\,kHz$$

4- 1- 2 المذبذبات مع دائرة LC للتغذية الراجعة Oscillators with RC Feedback Circuits :

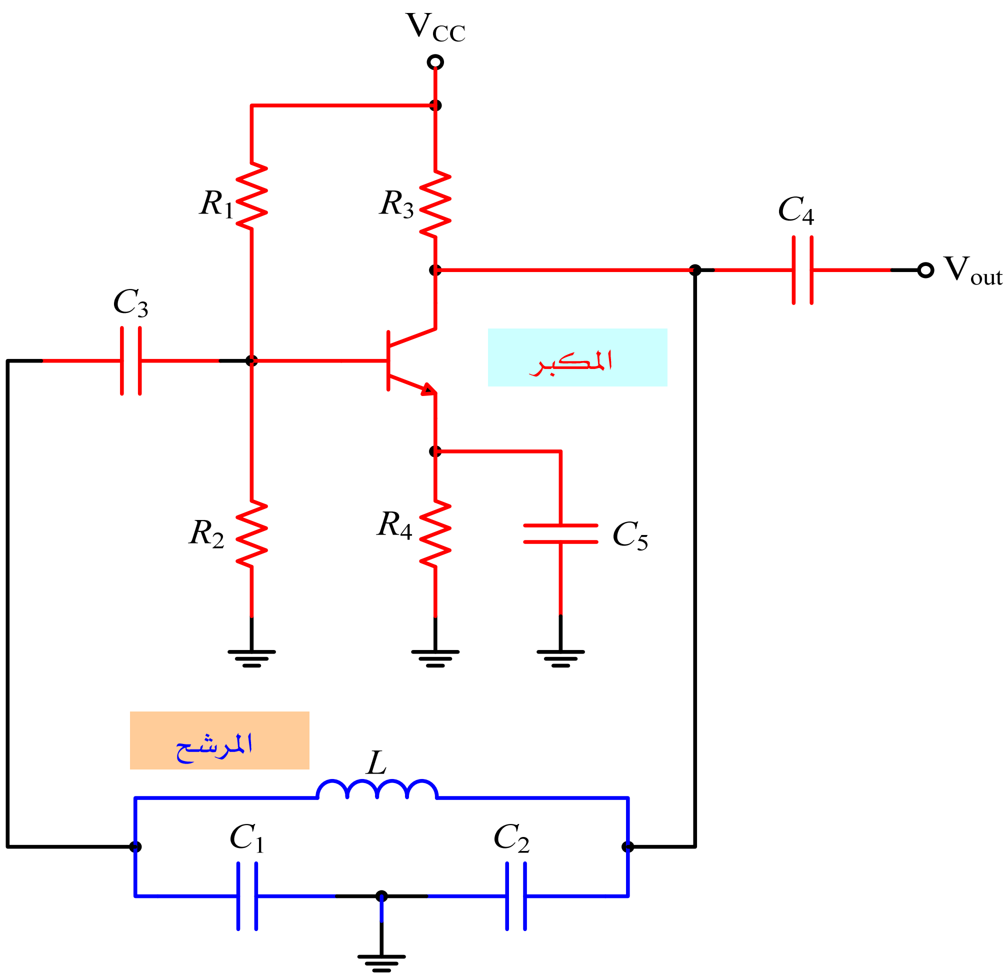
يستخدم هذا النوع من الدوائر للحصول على مذبذبات تعمل على ترددات عالية (أعلى من 1 MHz). للحصول على التكبير المطلوب تستخدم العناصر الالكترونية (الترانزستور BJT أوFET) كبديل عن مكبر العمليات وذلك لأن الترددات المطلوب توليدها عالية القيمة ولا يصلح مكبر العمليات في هذه الحالة (Lower unity-gain frequency). للحصول على فرق الطور المطلوب ومرشح الرنين تستخدم دوائر LC في مسار التغذية الراجعة.

هنالك أنواع مختلفة من هذه المذبذبات أهمها:

- مذبذب كولبت Colpitts Oscillator.
- مذبذب كلاب Clapp Oscillator.
- مذبذب ارمسترونج Armstrong Oscillator .
- مذبذب الكريستال Crystal-controlled Oscillator.
- مذبذب هارتلي Hartley Oscillator.

4- 1- 2- 1 مذبذب كولبت Colpitts Oscillator:

يظهر الشكل (4- 11) دائرة مذبذب كولبت مكون من مرشح نطاق معين BPF حيث يمرر تردد التذبذب المرغوب فيه فقط. يقوم جزء المرشح بتحقيق الشرط الأول والخاص بفرق زاوية الطور ويحقق المكبر (الترانزستور BJT) الشرط الثاني الخاص بمعامل التكبير المطلوب.



الشكل (4- 11) دائرة مذبذب كولبت.

يمكننا تحديد تردد الرنين للدائرة حسب العلاقة التالية:

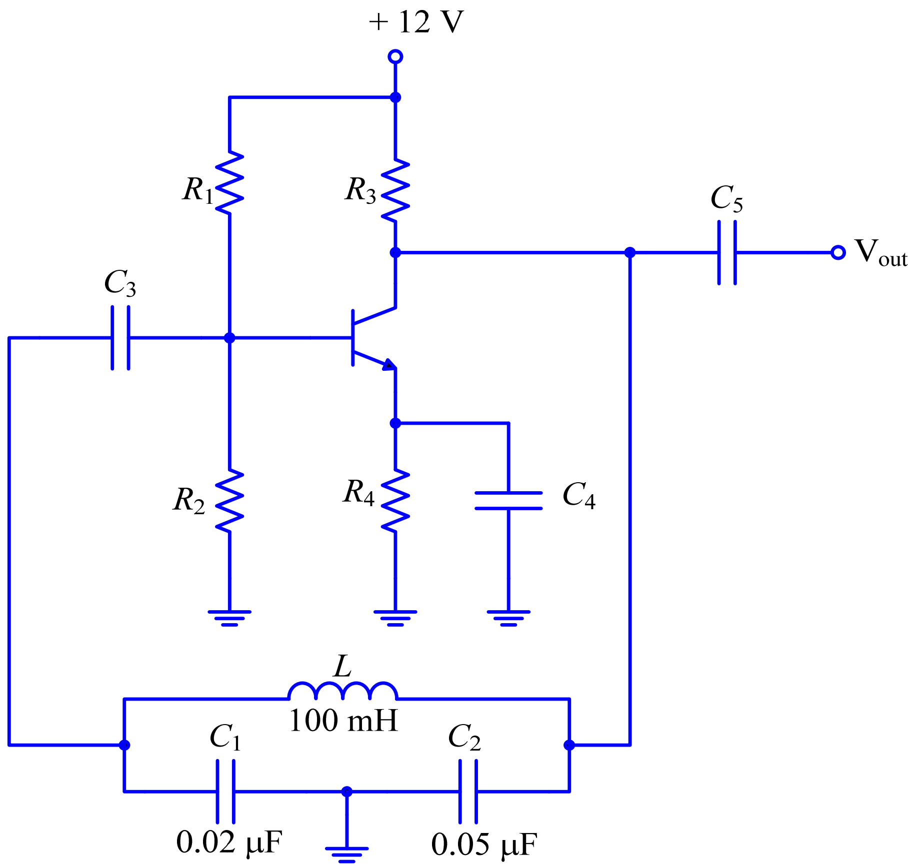
$$f_r \cong \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_T}} \qquad (4-7)$$

حيث إن المكثفات C_1 و C_2 متصلات على التوالي، لذلك فإن السعة الكلية C_T

$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \qquad (4-8)$$

مثال 4- 3:

احسب تردد المذبذب الموضح على الشكل أدناه:



الشكل (4- 12)

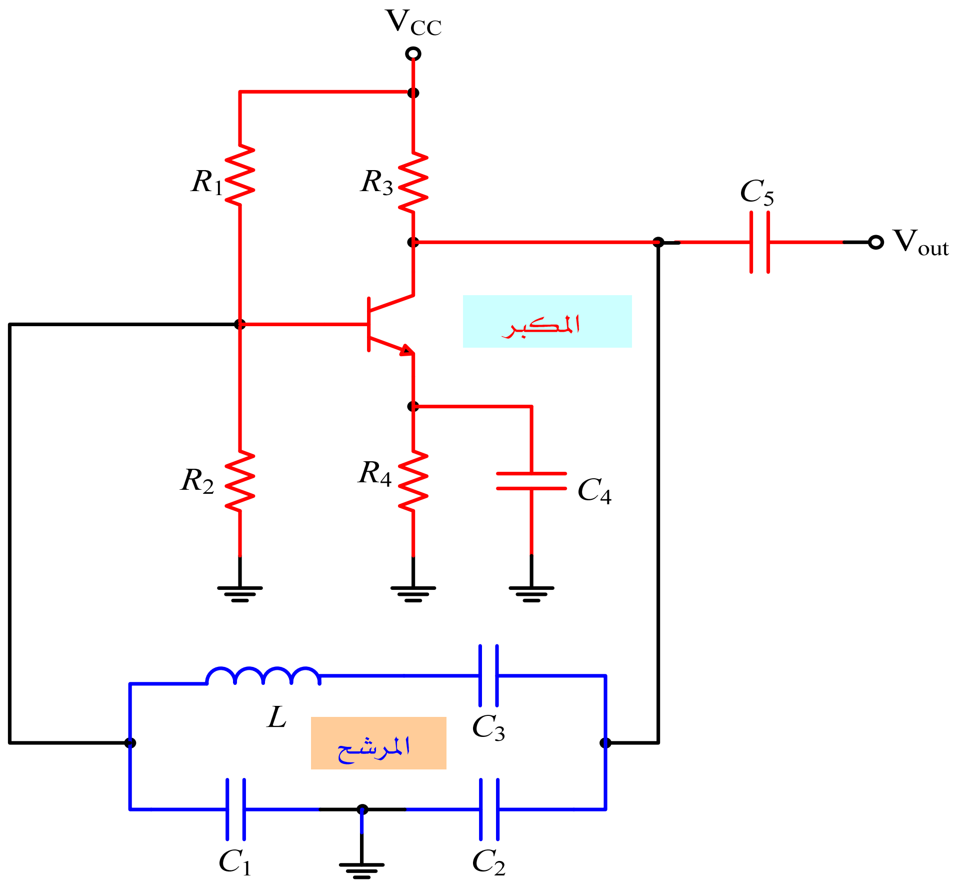
الحل:

$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{(0.02\,\mu\text{F})(0.05\,\mu\text{F})}{0.02\,\mu\text{F} + 0.05\,\mu\text{F}} = 0.014\,\mu\text{F}$$

$$f_r \cong \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_T}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(100\,\text{mH}) \times (0.014\,\mu F)}} = 4.255\,\text{kHz}$$

4- 1- 2- 2 مذبذب كلاب Clapp Oscillator

يعتبر هذا النوع من المذبذبات كنموذج معدل لمذبذب كولبت حيث تم إضافة مكثف (C_3) على التوالي مع الملف (L) حسبما هو موضح على الشكل (4- 13). أيضاً C_3 موصول على التوالي مع C_1 و C_2 .



الشكل (4- 13) دائرة مذبذب كلاب

يمكننا تحديد تردد الرنين للدائرة حسب العلاقة التالية:

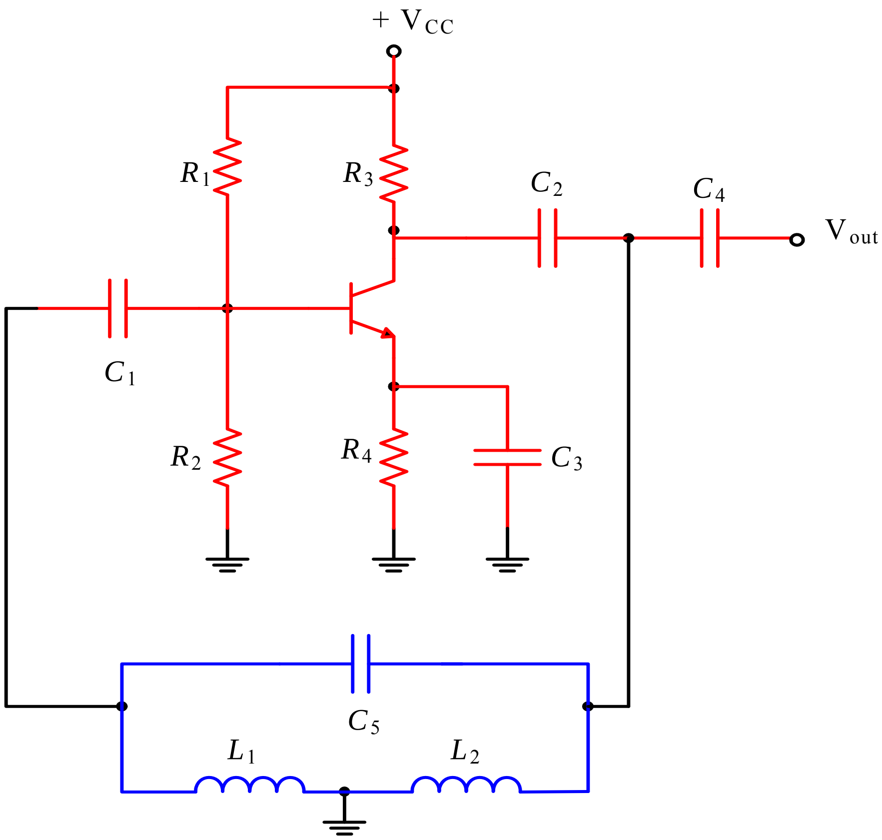
$$f_r \cong \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_T}} \qquad (4-9)$$

حيث إن المكثفات C_1 ، C_2 و C_3 متصلات على التوالي، لذلك فإن السعة الكلية C_T :

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} \qquad (4-10)$$

4- 1- 2- 3 مذبذب هارتلي Hartley Oscillator :

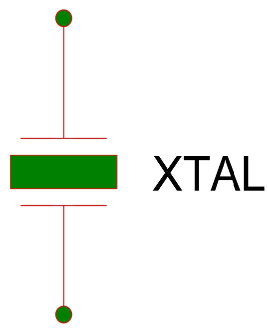
يعتبر هذا النوع من المذبذبات كنموذج معدل لمذبذب كولبت حيث تم إضافة ملف آخر (L_2) على التوالي مع الملف (L_1) مع الإبقاء على مكثف واحد على التوازي مع الملفين (الشكل 4- 14).



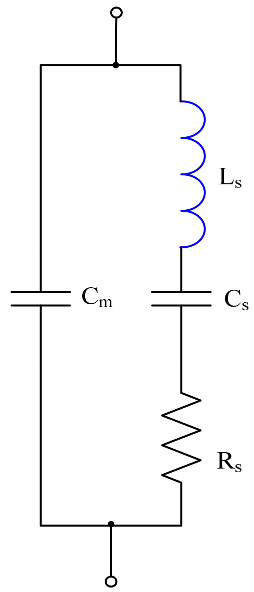
الشكل (4- 14) دائرة مذبذب هارتلي

4- 1- 3 المذبذب الكريستالي Crystal Oscillator :

إن أكثر المذبذبات دقة وثبات في الأداء هي التي تستخدم الكريستال (Crystal) في دائرة التغذية الراجعة للتحكم بقيمة التردد المراد توليده. الكريستال عبارة عن مادة طبيعية تولد ترددات دقيقة جداً حسب حجم القطعة. يرمز إلى المذبذبات الكريستالية كما في الشكل (4- 15- أ). يتكون الكريستال المستخدم في التطبيقات الالكترونية من رقاقة كريستال مثبتة بين قطبين (Electrodes) ومغلفة بغلاف خارجي للحماية.



(أ)



(ب)

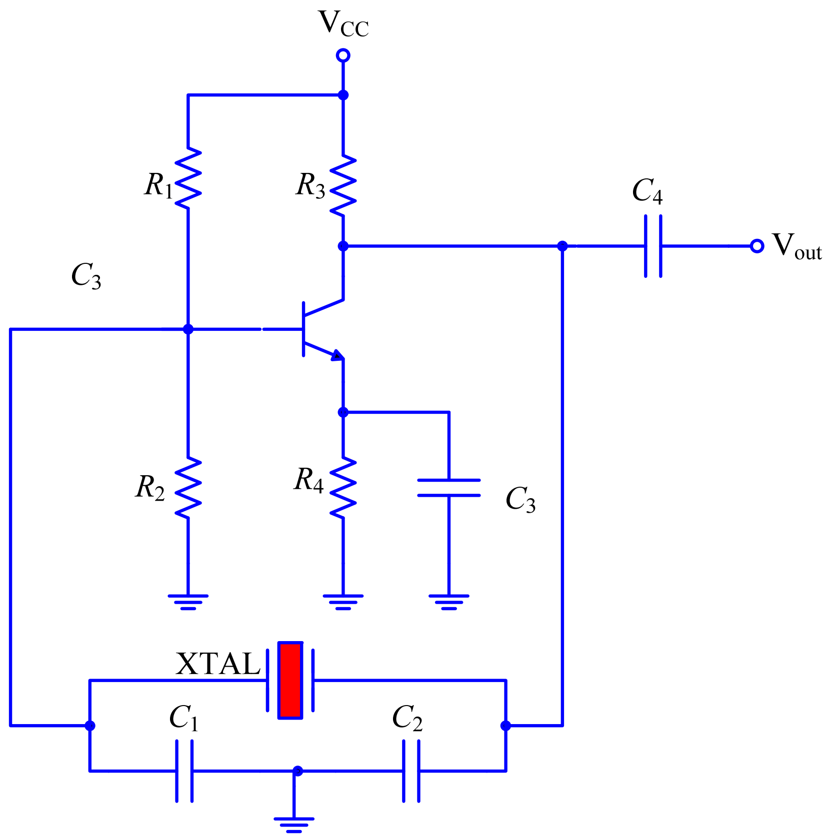
الشكل (4- 15) رمز الكريستال (أ) والدائرة الكهربائية المكافئة (ب)

مبدأ عمل الكريستال :

يتمتع الكريستال الطبيعي بخاصية فريدة تسمى ظاهرة الكهربائية الإجهادية (Piezoelectric Effect) والتي تعني أنه عندما تتعرض قطعة من الكريستال بحجم معين لحركة ميكانيكية خارجية فإنها تقوم بالتذبذب ويتكون جهد كهربائي على نفس تردد الذبذبة المتكونة والعكس صحيح بمعنى أنه عند توصيل جهد متناوب على قطعة الكريستال فإنها ستقوم بالتذبذب على نفس تردد الجهد الواصل عليها. للحصول على أفضل تذبذب للكريستال يجب استخدام تردد الرنين الخاص به حيث إن لكل قطعة كريستال وحسب حجمها وطريقة قطعها تردد الرنين الخاص بها.

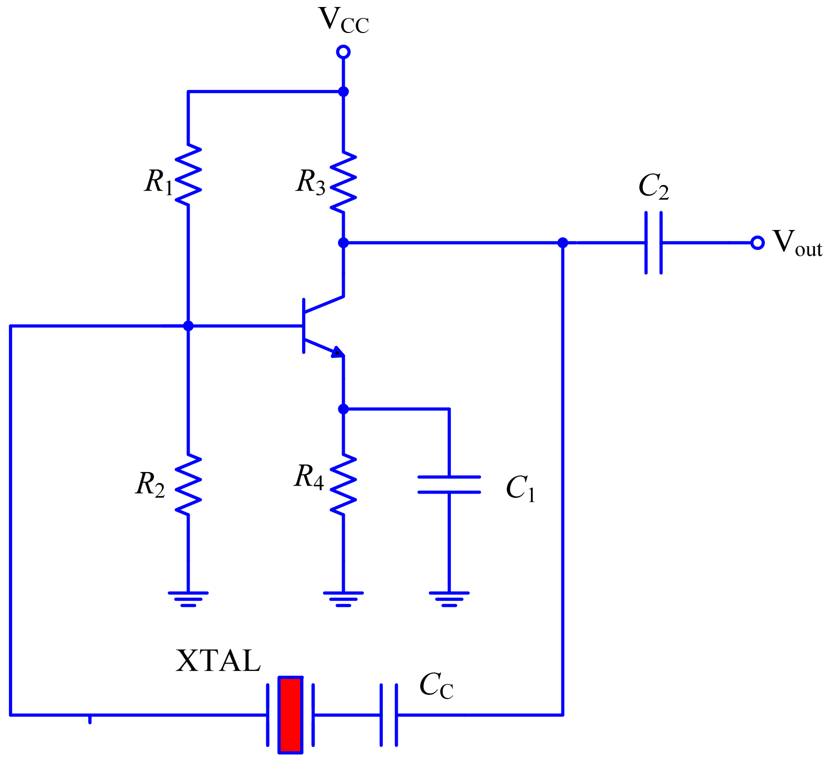
تتكون الدائرة الكهربائية المكافئة للكريستال من توصيلة مقاومة ومكثف وملف كما هو موضح على الشكل (4- 15- ب) حيث يمكن أن تعمل في رنين التوالي أو التوازي.

يوضح الشكل (4- 16) دائرة مذبذب كريستالي والذي هو عبارة عن مذبذب كولبتس معدل حيث تم استخدام الكريستال في حالة رنين التوازي (Parallel Resonance).



الشكل (4- 16) مذبذب كريستالي في حالة رنين التوازي

يمكننا استخدام الكريستال في دائرة المذبذب في حالة رنين التوالي (Series Resonance)كما هو موضح على الشكل (4- 17).



الشكل (4- 17) مذبذب كريستالي في حالة رنين التوالي

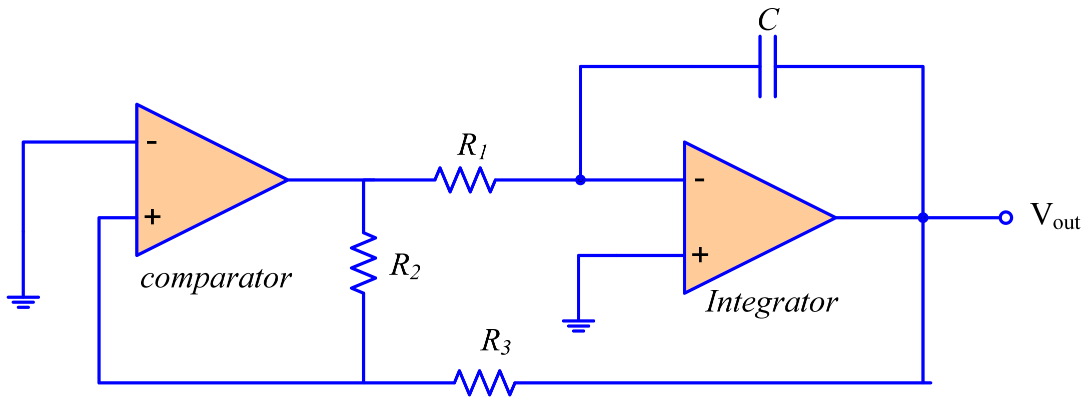
4- 2 مذبذبات الإشارات غير الجيبية Nonsinusoidal Waveforms Oscillators:

سوف نتعرف في هذا الجزء على دوائر توليد الذبذبات غير الجيبية (المربعة ، المثلثة ، المسننة ، ...) والتي تعرف بـ (Relaxation Oscillators). في مثل هذا النوع من الدوائر يلزمنا دائرة مؤقت RC (RC Timing Circuit) وقطعة الكترونية تقوم بتبديل الحالة (Change State).

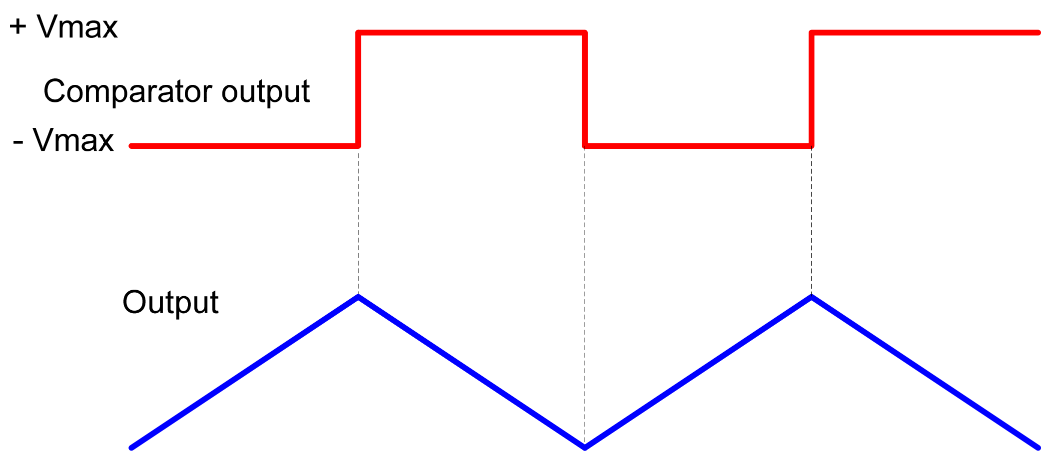
4- 2- 1 مذبذب الموجة المثلثة Triangular-Wave Oscillator:

يمكننا استخدام مكبر العمليات (مكبر التكامل) والذي درسناه في الوحدة الثانية كأساس لدائرة مذبذب الموجة المثلثة. يلزمنا استخدام مفتاح ثنائي القطبية في بداية الدائرة للتحويل من الموجب للسالب وبالعكس حتى نتمكن من الحصول على الموجة المثلثة (الصاعدة والهابطة). يوضح الشكل (4- 18) دائرة عملية للحصول على الموجة المثلثة حيث تم استخدام مكبر العمليات الأول في مقدمة الدائرة

كمقارن (Comparator) والذي يقوم بدور المفتاح ثنائي القطبية. يوضح الشكل (4- 19) الموجة الناتجة على مخرج المذبذب.



الشكل (4- 18) دائرة مذبذب موجة مثلثة



الشكل (4- 19) شكل الموجة الناتجة على مخرج المذبذب

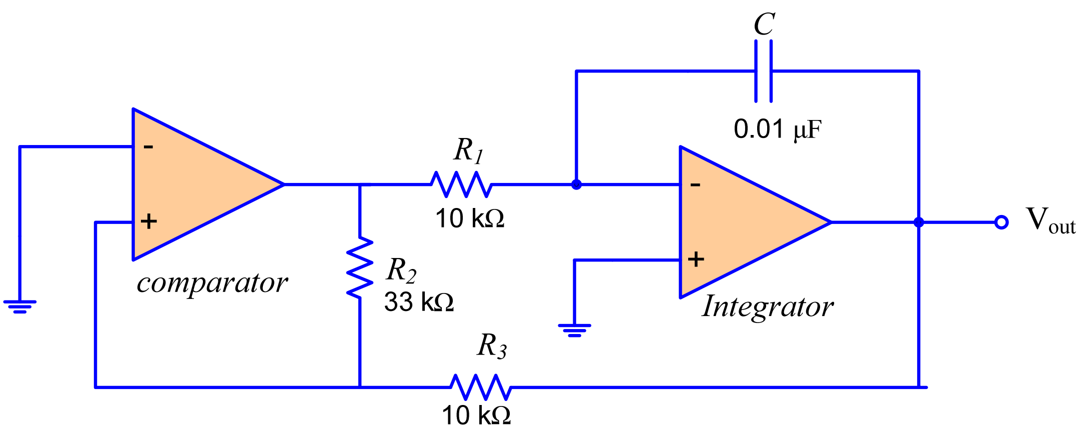
لحساب تردد التذبذب للدائرة السابقة نستخدم العلاقة التالية:

$$f_r = \frac{1}{4R_1 C}\left(\frac{R_2}{R_3}\right)$$ (4-11)

مثال 4-4:

أ- احسب تردد المذبذب الموضح على الشكل أدناه.

ب- احسب قيمة المقاومة R_1 اللازمة للحصول على تردد 20 kHz.



الشكل (4-20)

الحل:

أ- باستخدام العلاقة (4- 11):

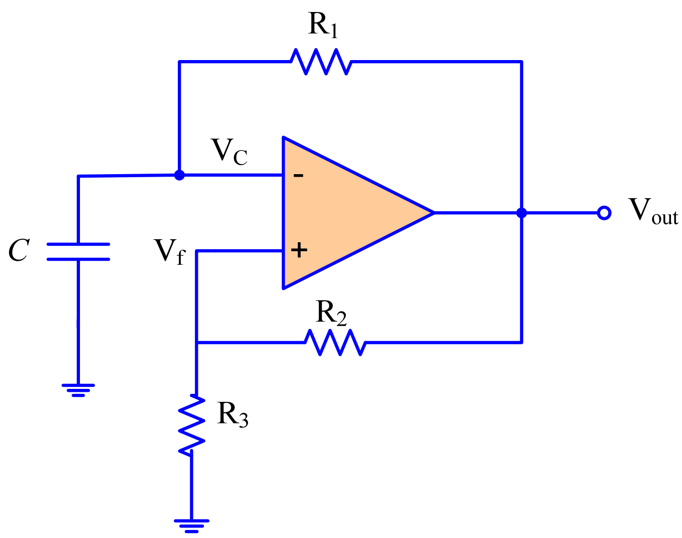
$$f_r = \frac{1}{4R_1C}\left(\frac{R_2}{R_3}\right) = \frac{1}{4\times10\,k\Omega\times0.01\,\mu F}\left(\frac{33\,k\Omega}{10\,k\Omega}\right) = 8.25\,kHz$$

ب- من العلاقة (4- 11) يمكننا إيجاد قيمة R_1 اللازمة للحصول على التردد المطلوب:

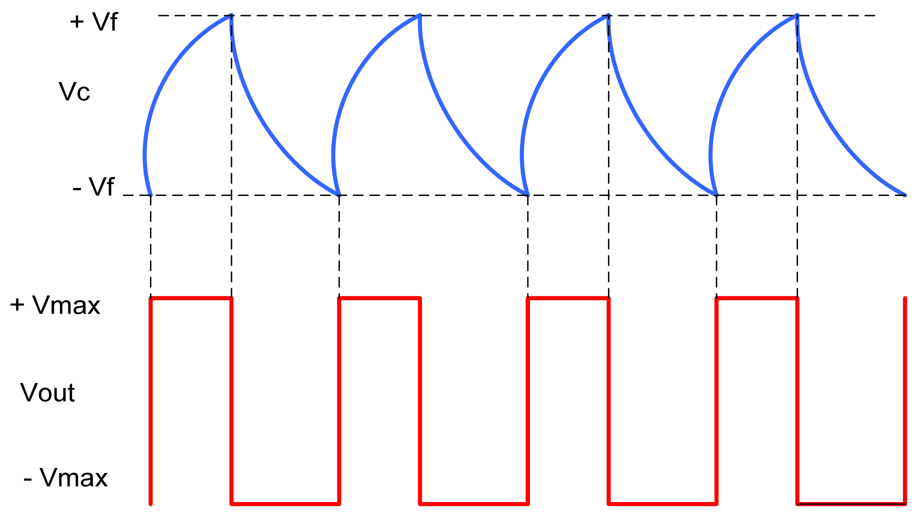
$$R_1 = \frac{1}{4fC}\left(\frac{R_2}{R_3}\right) = \frac{1}{4\times20\,kHz\times0.01\,\mu F}\left(\frac{33\,k\Omega}{10\,k\Omega}\right) = 4.13\,k\Omega$$

4- 2- 2 مذبذب الموجة المربعة Square-Wave Oscillator:

يوضح الشكل (4- 21) مولد الموجة المربعة والذي يستخدم المكثف C من أجل الشحن والتفريغ كما هو موضح على الشكل (4- 22).



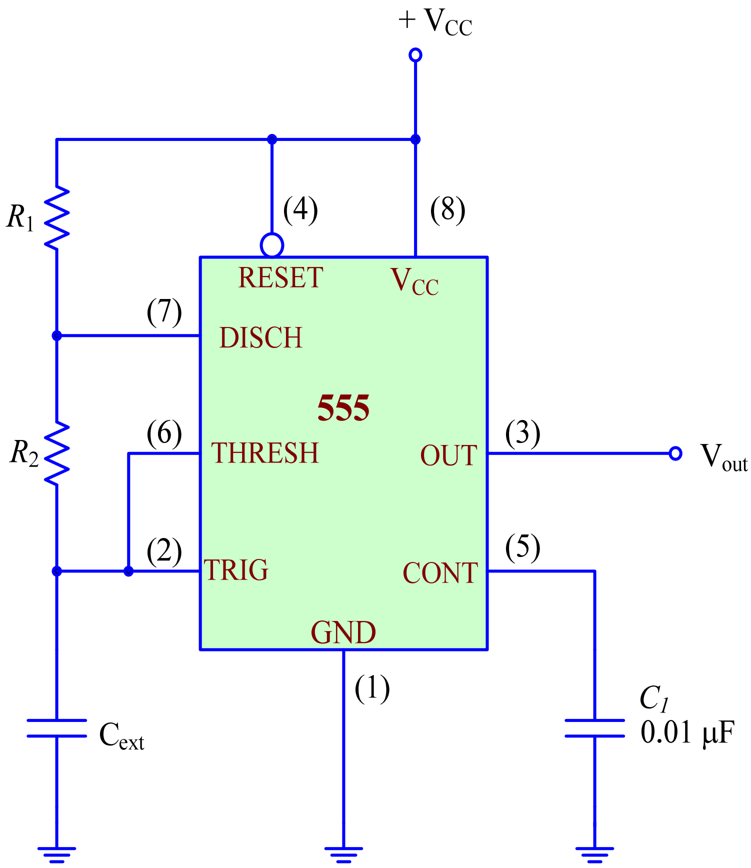
الشكل (4- 21) مولد ذبذبات الموجة المربعة



الشكل (4- 22) فكرة عمل مولد ذبذبات الموجة المربعة

4- 2- 3 مذبذب الموجة المربعة باستخدام المؤقت 555 Timer Square-Wave Oscillator

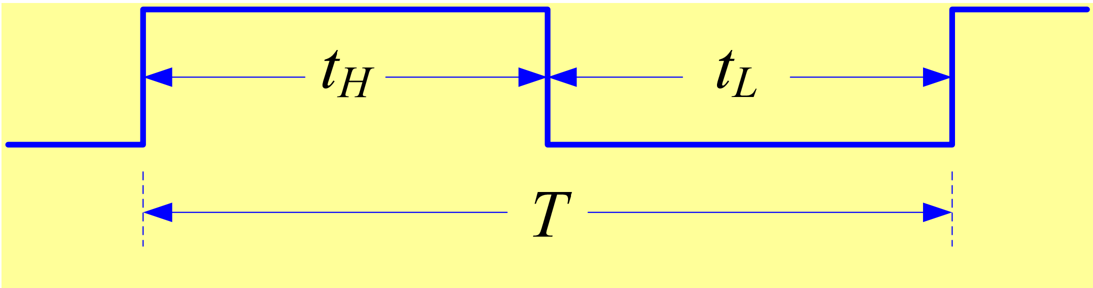
من أشهر الدوائر التي تُستخدم لتوليد الموجة المربعة هي دائرة المؤقت المتكاملة (555 Timer). إحدى التطبيقات الهامة تسمى عديم الاستقرار (Unstable) كما هو موضح على الشكل (4- 23).



الشكل (4- 23) مذبذب عديم الاستقرار باستخدام المؤقت 555

لحساب تردد الدائرة f_r يلزمنا حساب الزمن الدوري (T) للموجة المربعة (الشكل 4- 24) وفقاً للعلاقة التالية:

$$T = t_H + t_L \qquad (4-12)$$



الشكل (4- 24) الزمن الدوري للموجة المربعة.

حيث ترمز t_H إلى الزمن الذي تبقى فيه الموجة في الوضع العالي (High):

$$t_H = 0.694(R_1 + R_2)C_{ext} \qquad (4-13)$$

والزمن t_L هو الزمن الذي تبقى فيه الموجة في الوضع المنخفض (Low):

$$t_L = 0.694 R_2 C_{ext} \qquad (4-14)$$

بعد تعويض (4- 13) و (4- 14) في العلاقة (4- 12) يكون الزمن الدوري للموجة:

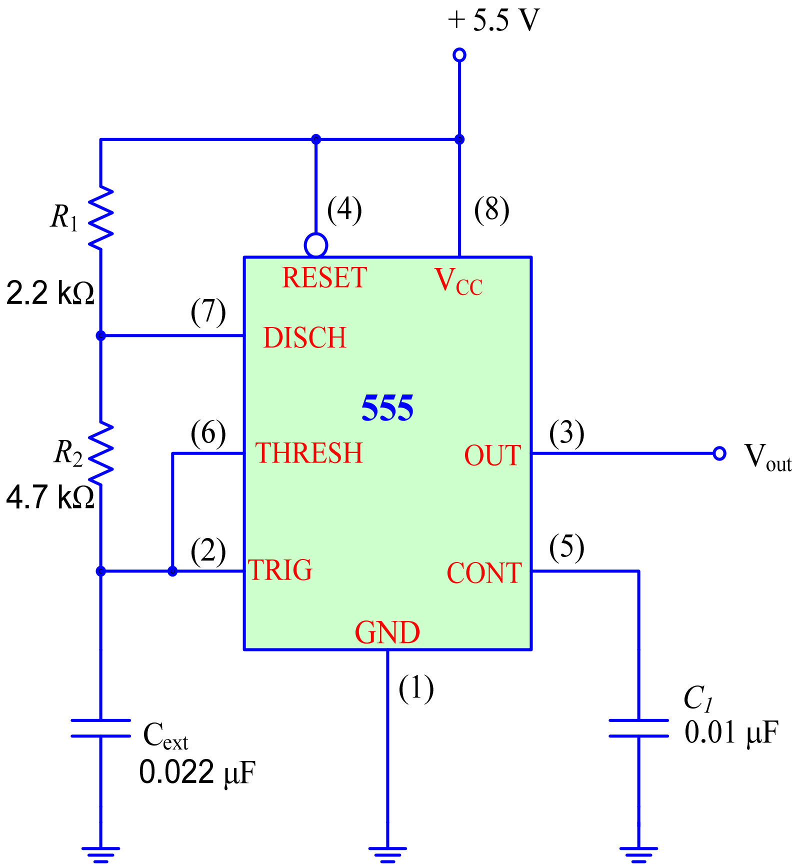
$$T = t_H + t_L = 0.694\left(R_1 + 2R_2\right)C_{ext}$$ (4-15)

ويمكن حساب التردد بالعلاقة المعروفة:

$$f_r = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{\left(R_1 + 2R_2\right)C}$$ (4-16)

مثال 4- 5 :

احسب تردد المذبذب الموضح على الشكل أدناه.



الشكل (4-25)

الحل:

باستخدام العلاقة (4- 16):

$$f_r = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)\,C} = \frac{1.44}{(2.2\ \text{k}\Omega + 2 \times 4.7\ \text{k}\Omega)0.022\ \mu\text{F}} = 5.64\ \text{kHz}$$

أسئلة وتمارين

1- ما هي أهم أنواع الإشارات المستخدمة في الالكترونيات والاتصالات (مع الرسم)؟

2- أشرح مبدأ عمل مذبذبات RC.

3- أشرح مبدأ عمل المذبذبات غير الجيبية.

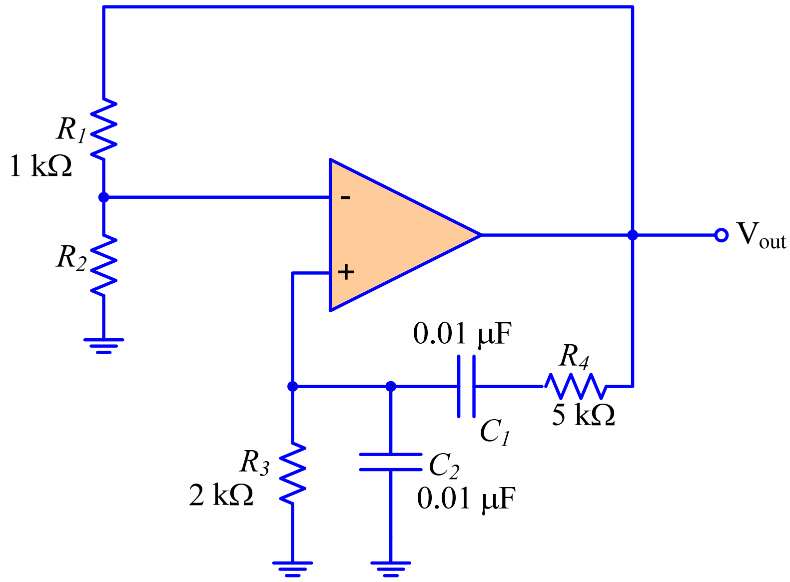
4- ما هي شروط عمل مذبذبات التغذية الراجعة؟

5- لديك دائرة مذبذب على الشكل (4- 26).

أ- ما نوع المذبذب؟

ب- احسب تردد الرنين للمذبذب.

جـ- احسب قيمة المقاومة R_2.



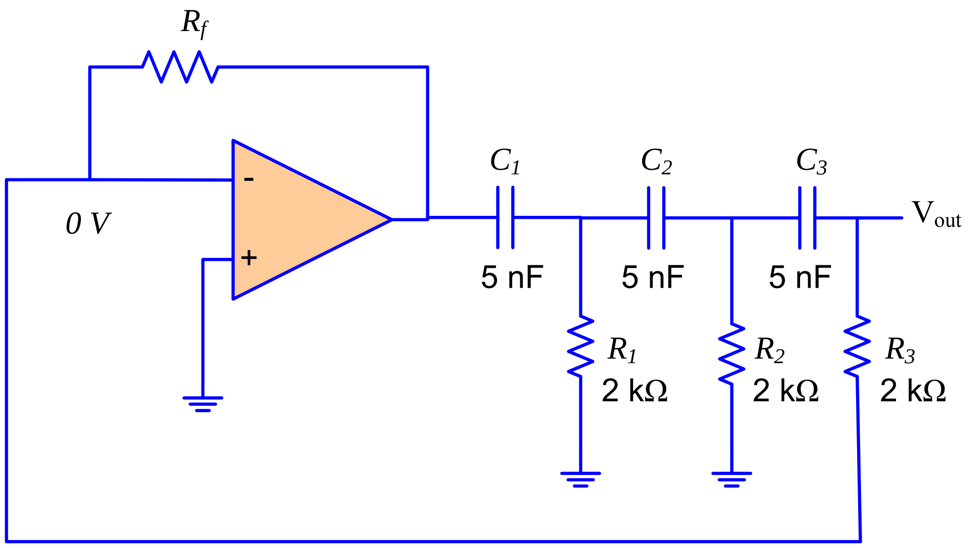
الشكل (4- 26)

6- لديك دائرة مذبذب على الشكل (4- 27):

أ- ما هو نوع المذبذب؟

ب- احسب قيمة R_f اللازمة لعمل الدائرة التالية كمذبذب.

جـ- أوجد تردد الرنين للدائرة.



الشكل (4- 27)

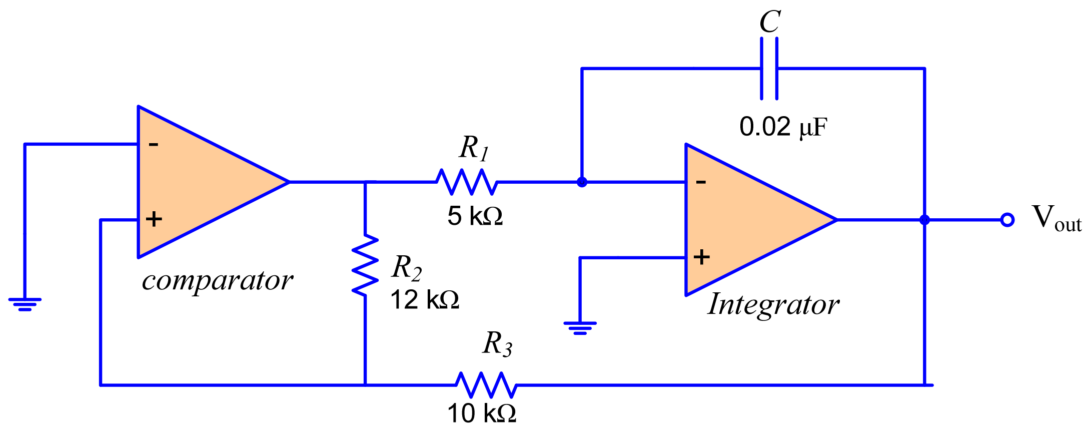
7- ما هو الفرق بين مذبذب كلاب ومذبذب كولبت؟

8- أشرح مبدأ عمل المذبذب الكريستالي.

9- لديك دائرة مذبذب على الشكل (4- 28):

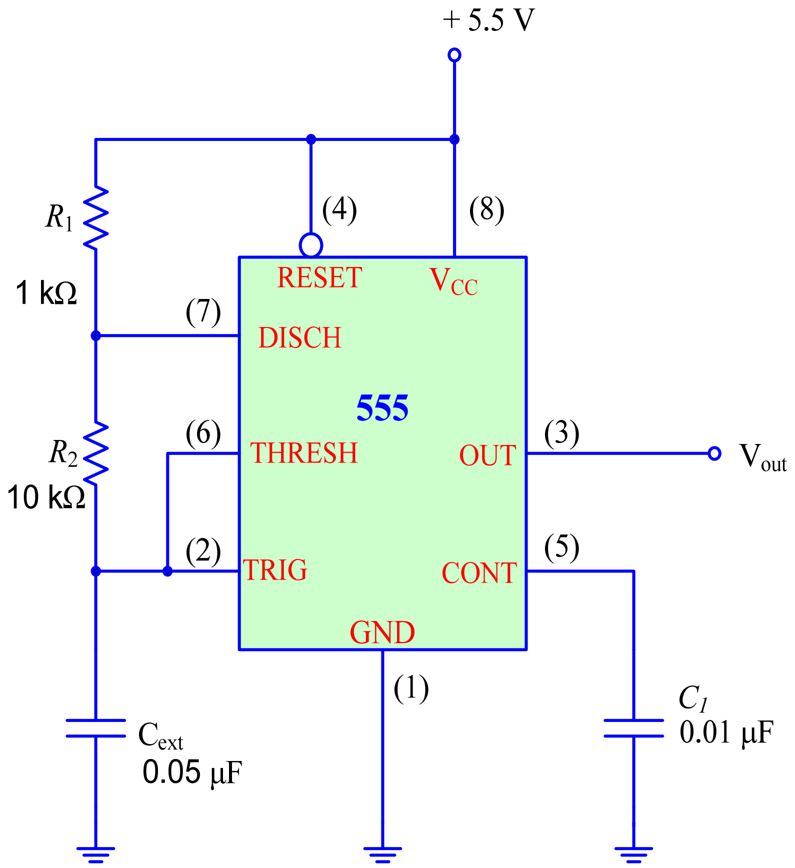
أ- احسب تردد المذبذب الموضح على الشكل أدناه.

ب- احسب قيمة المقاومة R_1 اللازمة للحصول على تردد 50 kHz.



الشكل (4- 28)

10- احسب تردد المذبذب الموضح على الشكل أدناه.


+ 5.5 V
(4)
(8)
R_1
1 kΩ
RESET
V_{CC}
(7)
DISCH
555
R_2
10 kΩ
(6)
THRESH
OUT
(3)
V_{out}
(2)
TRIG
CONT
(5)
GND
(1)
C_{ext}
0.05 µF
C_1
0.01 µF

الشكل (4- 29)

دوائر التعديل

5

الجدارة: القدرة على التعامل مع دوائر التعديل التماثلي بأنواعها الرئيسية.

الأهداف: بعد دراسة هذه الوحدة يكون المتدرب قادراً على:

- أن يتعرف المتدرب على دوائر التعديل التماثلي
- أن يتعرف المتدرب دوائر توليد تعديل السعة
- أن يتعرف المتدرب دوائر توليد تعديل التردد
- أن يتعرف المتدرب دوائر توليد تعديل الطور

الوقت المتوقع للتدريب: 6 ساعات.

دوائر التعديل

Modulation Circuits

مقدمة:

سوف نتناول في هذه الوحدة دراسة دوائر التعديل التماثلي والتي تستخدم في أنظمة الاتصالات التماثلية (Analog Communication Systems) وتحديداً دوائر تعديل السعة (Amplitude Modulation) ودوائر تعديل التردد (Frequency Modulation).

هنالك أكثر من سبب لتعديل أو تضمين الإشارات:

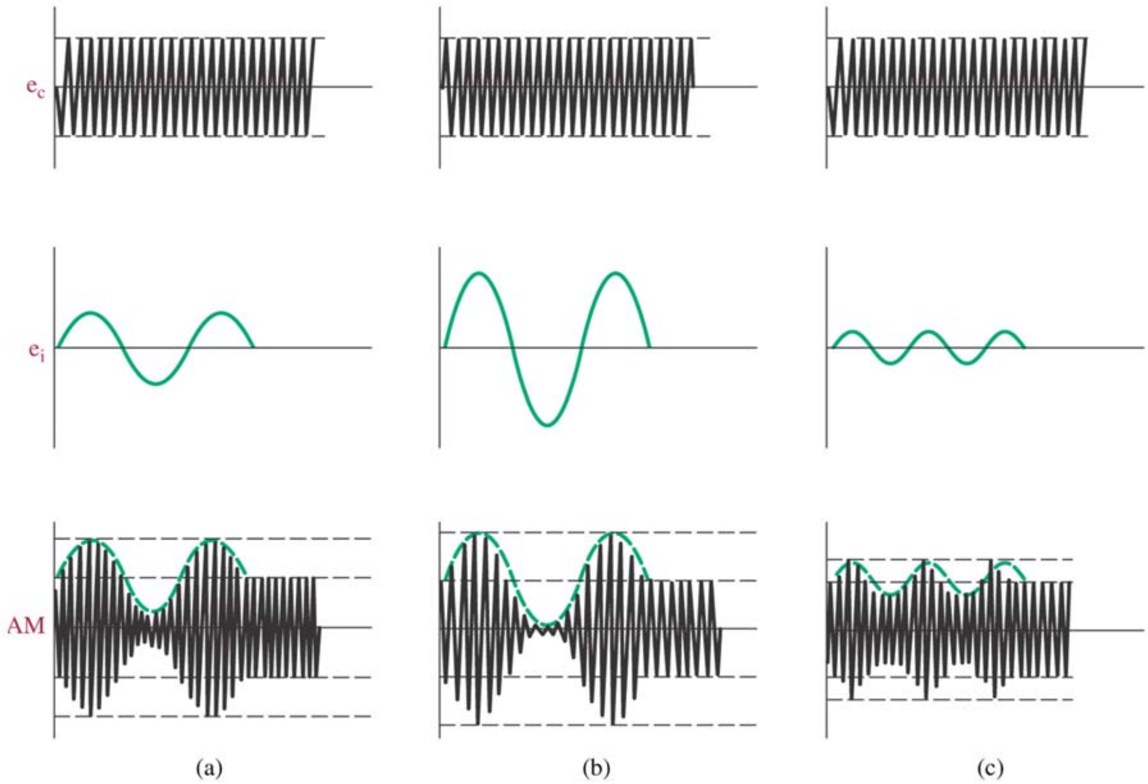
- معظم إشارات النطاق الترددي الأساسي الناشئة من مصادر المعلومات المختلفة لا تكون دائماً مناسبة للنقل عبر قنوات الاتصالات المتاحة (السلكية أو اللاسلكية). فمثلاً الإشارة الصوتية في نظام الاتصالات الهاتفية ذات تردد من صفر إلى (4)كيلوهيرتز وإشارة التلفزيون التماثلي من صفر إلى (6)ميجاهيرتز.
- إمكانية دمج (Multiplexing) أكثر من إشارة عبر نفس قناة الاتصال.
- تسهيل عملية تصميم الهوائي في حالة الاتصالات اللاسلكية.

ولذلك فإن الإشارات المراد إرسالها عبر أنظمة الاتصالات تعدل لتسهيل عملية النقل وتعرف هذه العملية بالتضمين حيث من خلالها تُعدل إشارة المعلومات الأساسية **(Information Signal)** والتي سنرمز لها $m(t)$ على بعض خصائص الإشارة الحاملة (Carrier) ذات التردد العالي (السعة أو التردد أو الطور)، حيث تتم عملية التضمين في منطقة الإرسال (Transmitter). الإشارة الحاملة هي عبارة عن إشارة موجية عالية التردد ويتم تعديل أحد خواصها مثل السعة، والتردد ، والطور بمقدار يتناسب مع إشارة

المعلومات الأساسية *m(t)*. وهذا يؤدي لإنتاج تضمين السعة (AM)، وتضمين ترددي (FM)، وتضمين طوري (PM).

5- 1 دوائر تعديل السعة AM Modulators:

للحصول على تعديل السعة يجب تعديل سعة أو ارتفاع (Amplitude) إشارة الحامل وفقاً لتغير الإشارة المراد إرسالها (الشكل 5- 1).



الشكل (5-1) تعديل السعة AM

رياضياً، يمكننا كتابة إشارة الحامل كإشارة جيبية حسب الصيغة التالية:

$$carrier,\ v_c = V_c \sin 2\pi f_c t \qquad (5\text{-}1)$$

حيث الرموز:

Vc : سعة أو ارتفاع (Amplitude) الإشارة

fc : تردد الحامل بوحدة الهيرتز

t : متغير الزمن

يمكننا كتابة الإشارة المراد تحميلها أو إرسالها (المعلومة) كإشارة جيبية حسب الصيغة التالية:

$$message,\ v_m = V_m \sin 2\pi f_m t \qquad (5\text{-}2)$$

مع نفس معاني الرموز السابقة إنما لإشارة المعلومة.

هنالك أكثر من نوع لتعديل السعة أهمها:

- التعديل السعوي مع النطاق الجانبي المزدوج والحامل Double Sideband with Carrier
- التعديل السعوي مع النطاق الجانبي المزدوج مع إلغاء الحامل

Double Sideband Suppressed Carrier وتعرف اختصاراً DSBSC

- التعديل السعوي أحادي الجانب Single Sideband AM .

هنالك نطاق جانبي أعلى (Upper Side Band) ونطاق أدنى (Lower Side Band) سوف نتعرف في المثال التالي على كيفية حسابهما.

لتحديد معامل التعديل (Modulation Index) أو نسبة التعديل والذي يرمز له m يجب أن نعرف سعة إشارة الحامل (Vc) وسعة الإشارة المراد إرسالها أو تحميلها (Vm)

مثال 5- 1

لديك إشارة موسيقية ذات نطاق ترددي من (20 Hz) ولغاية (10 kHz) يلزمنا تحميلها على تردد (1.4 MHz) باستخدام التعديل السعوي (AM). أوجد ترددات النطاق الجانبي الأعلى والأدنى.

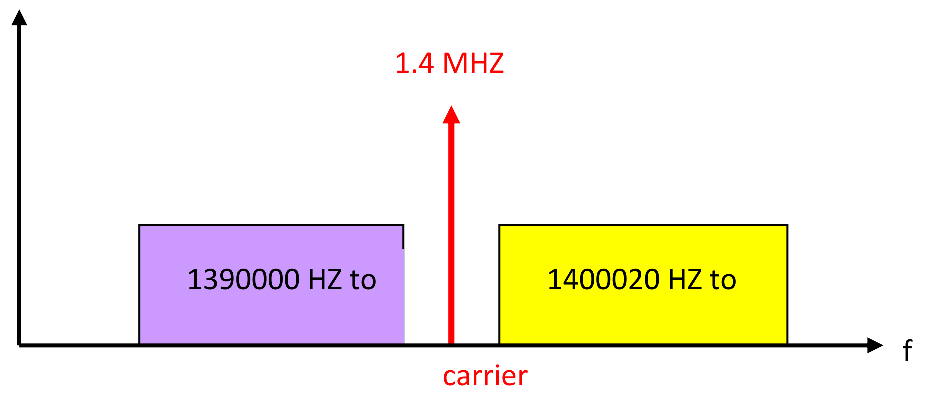
الحل:

النطاق الأعلى:

$$\begin{aligned} &From\ 1.4\,MHz + 20\,Hz \quad to \quad 1.4\,MHz + 10\,kHz \\ &\quad = 1400020\ \ Hz \quad to \quad 1401000\ \ Hz \end{aligned}$$

النطاق الأدنى:

$$\begin{aligned} &From\ 1.4\,MHz - 10\,kHz \quad to \quad 1.4\,MHz - 20\,Hz \\ &\quad = 1390000\ \ Hz \quad to \quad 1399980\,Hz \end{aligned}$$



هنالك طريقتان للحصول على تعديل السعة:

الطريقة الأولى: من خلال ضرب الحامل (Carrier) بمعامل تكبير (Gain) أو توهين (Attenuation) والذي يتغير وفقاً للإشارة المراد تعديلها m(t). لتوضيح عمل هذه الطريقة انظر العلاقة (5- 1):

$$V_{AM} = V_C \sin 2\pi f_C t\,(1 + m \sin 2\pi f_m t) \qquad (5-3)$$

حيث ترمز m إلى معامل التعديل (Modulation Index) و (fc) إلى تردد الحامل و (fm) إلى تردد الإشارة أو المعلومة المراد تعديلها.

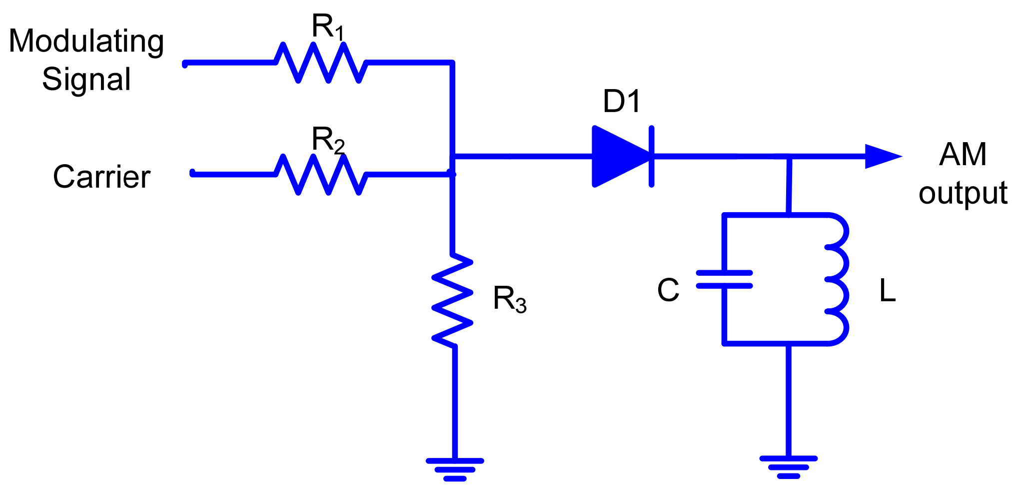
الطريقة الثانية: من خلال الدمج (Mixing) الخطي أو الجمع الجبري للحامل والإشارة المراد تعديلها m(t) ومن ثم إدخال الإشارة الناتجة على قطعة إلكترونية أو دائرة غير خطية (مثل الصمام الثنائي، والترانزستور، وترانزستور تأثير المجال FET) حيث يتغير التيار مع مربع الجهد الداخل عليه. للتخلص من

الترددات غير المرغوب بها والتي ستظهر على مخرج الدائرة نستخدم مرشح (Filter) أو دائرة توليف (Tuning Circuit) والذي سيمرر تردد الحامل والتردد الجانبي المجاور (Sidebands).

5- 1- 1 دائرة التعديل باستخدام الصمام الثنائي Amplitude Modulator with a Diode

تعتبر هذه الدائرة (الشكل 5- 2) الأقدم والأبسط للحصول على تعديل السعة حيث تتكون من:

- دائرة الخلط (مقاومتين R1 و R2).
- صمام ثنائي D1.
- دائرة التوليف LC .



الشكل (5- 2) دائرة التعديل باستخدام الصمام الثنائي

مبدأ العمل:

يتم إدخال الحامل على إحدى المقاومتين (R1) أو (R2) بينما يتم إدخال الإشارة المراد تعديلها على المقاومة الأخرى. بعد الخلط أو الدمج الخطي (كمجمع جبري لهما) يتشكل الجهد الناتج على المقاومة (R3). بعد ذلك يتم إدخال الإشارة على الصمام الثنائي (ذو انحياز أمامي) حيث يقوم بتمرير الأجزاء الموجبة ذات ارتفاعات مختلفة وفقاً للإشارة الأصلية فقط ويلغي الأجزاء السالبة. تدخل تلك الإشارات

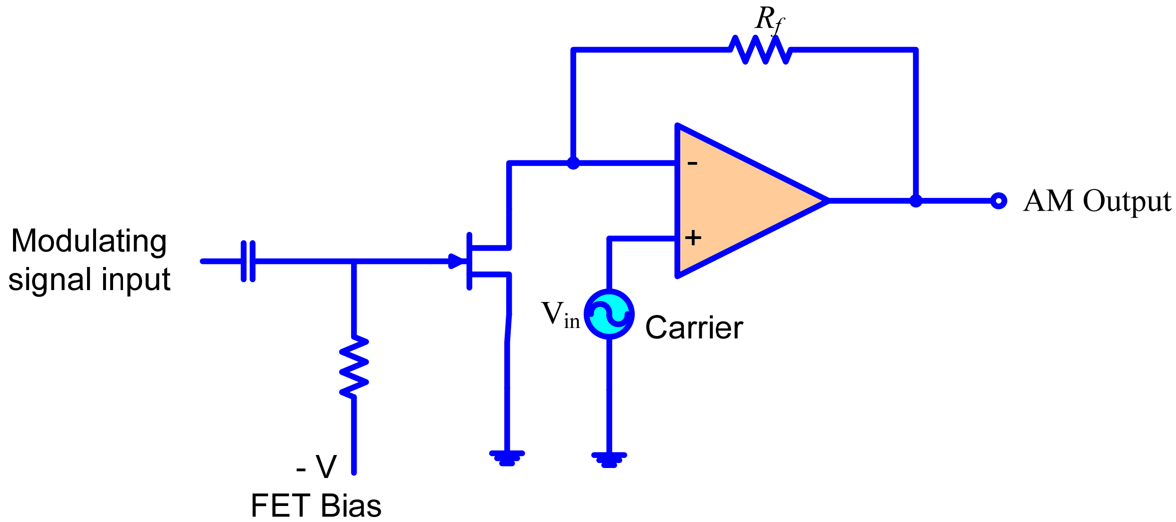
الموجبة على دائرة التوليف (Parallel LC) ذات تردد رنين مساوي لتردد الحامل (بعبارة أوضح تعمل دائرة LC كمذبذب على نفس تردد الحامل fc). الإشارة الناتجة على مخرج دائرة (LC) هي إشارة التعديل السعوي AM.

2-1-5 دائرة التعديل باستخدام ترانزستور تأثير المجال ومكبر العمليات
Amplitude Modulator with a JFET and Op-Amp

تتكون هذه الدائرة من مكبر العمليات وترانزستور تأثير المجال والذي يستخدم هنا كمقاومة متغيرة.

كما هو واضح من الشكل (5- 3) فان مكبر العمليات يستخدم في حالة الغير عاكس

(Noninverting) حيث يقوم بتكبير إشارة الحامل بمعامل تكبير يساوي:



الشكل (5- 3) دائرة التعديل باستخدام ترانزستور تأثير المجال ومكبر العمليات

$$Gain\ \ A = 1 + \frac{R_f}{R_i}$$ (5-4)

حيث ترمز Ri هنا إلى مقاومة الترانزستور المتغيرة. يتم توصيل الإشارة المراد إرسالها على بوابة الترانزستور (Gate) عبر مكثف. للحفاظ على انحياز عكسي على بوابة الترانزستور يتم تغذيتها بجهد مباشر سالب (Negative DC).

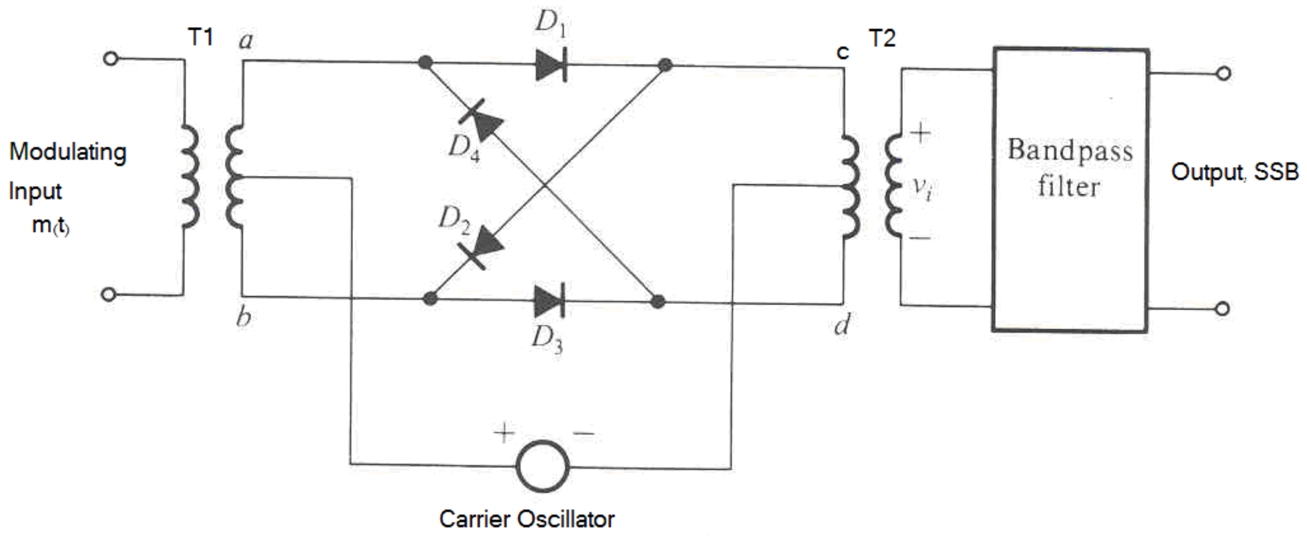
مبدأ العمل:

يتم توصيل الحامل بتردد وسعة محددين على المدخل الموجب لمكبر العمليات، يتغير معامل التكبير لمكبر العمليات بناء على تغير قيمة Ri والتي هي مقاومة الترانزستور والتي يحدد قيمتها ارتفاع أو سعة الإشارة المراد تحميلها أو إرسالها m(t) (عندما تكون الإشارة أعلى قيمة فإن مقاومة الترانزستور تصغر وبالتالي يزداد معامل التكبير والعكس صحيح) مما يغير من سعة إشارة الحامل وبالتالي الحصول على التعديل السعوي AM.

3-1-5 دائرة التعديل المتوازن Balanced Modulator

يستخدم هذا النوع من دوائر التعديل للحصول على نطاق جانبي مزدوج (Double Side Band ,DSB) الأعلى (Upper) والأدنى (Lower) مع إلغاء تردد الحامل (suppressed Carrier). للحصول على نطاق جانبي واحد (Single Side Band, SSB) يلزمنا استخدام دائرة مرشح (Filter) أو دائرة إزاحة الطور (Phase Shifting). أشهر أنوع دوائر التعديل المتوازن هو الصمام الثنائي الحلقي

(Diode Ring) كما هو موضح على الشكل (5- 4).



الشكل (5- 4) دائرة التعديل الصمام الثنائي الحلقي

مبدأ العمل:

تتكون الدائرة من:

- محوّلين، عن طريق المحول الأول (T1) يتم إدخال الإشارة المراد تحميلها وإرسالها ومن المحول الثاني (T2) يتم الحصول على إشارة الخرج.
- أربعة صمامات ثنائية موصولة حسب الشكل أعلاه (D1, D2, D3, and D4).
- يتم توصيل الحامل (Carrier) على نقطتي الوسط للمحولين الأول والثاني حيث إن إشارة الحامل أعلى من الإشارة المراد تحميلها من ناحية التردد والسعة (Amplitude). تتحكم إشارة الحامل بفتح وإغلاق الصمامات الثنائية عن طريق تحديد انحيازها الأمامي والعكسي.

تعمل الصمامات الثنائية كمفاتيح تقوم بتوصيل الإشارة المراد تحميلها من الملف الثاني للمحول الأول إلى الملف الأول للمحول الثاني.

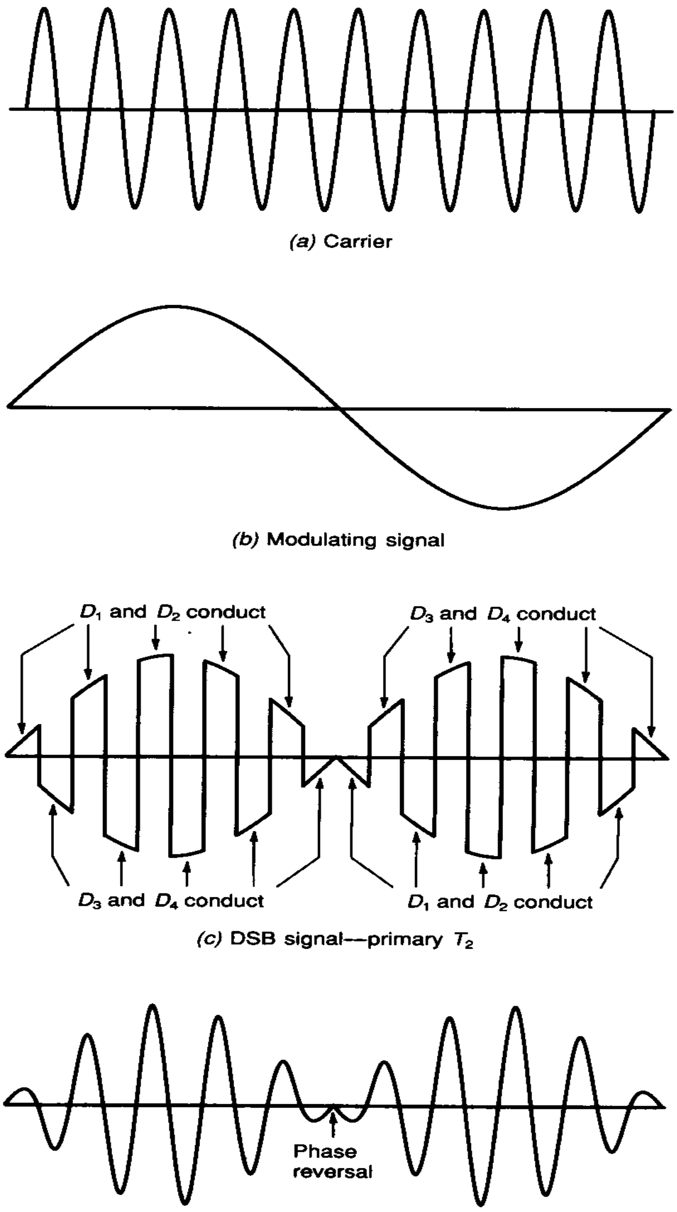
حسب قطبية إشارة الحامل يكون اثنان من الصمامات في حالة (ON) واثنان في حالة (OFF) (في حالة الرسم أعلاه يكون D1 و D3 في حالة انحياز أمامي (ON) بينما يكون كل من (D2) و (D4)في حالة انحياز عكسي (OFF).

أولاً: في حالة الإشارة على المدخل m(t) تساوي الصفر نحصل على تيارين متساويين ومتعاكسين في الاتجاه في الملف الأول للمحول الثاني مما يعطي محصلة صفر على المخرج للمحول الثاني (تم إلغاء الحامل). تعتمد درجة ومستوى إلغاء الحامل على دقة تصنيع المحولات ووضعية نقطة الوسط (Center Tap) فيهما مما يضمن الحصول على تيارين في الجزء العلوي والسفلي متساويين في القيمة ومتعاكسين في الاتجاه للحصول على الصفر وبالتالي إلغاء الحامل.

ثانياً: في حالة الإشارة على المدخل m(t) لا تساوي الصفر (إشارة جيبية بتردد منخفض) سوف تظهر على الملف الثاني للمحول الأول ومن ثم تقوم الصمامات الثنائية بتوصيلها بعدد من المرات إلى الملف الأول من المحول الثاني وذلك بالاعتماد على إشارة الحامل من حيث القطبية والتردد.

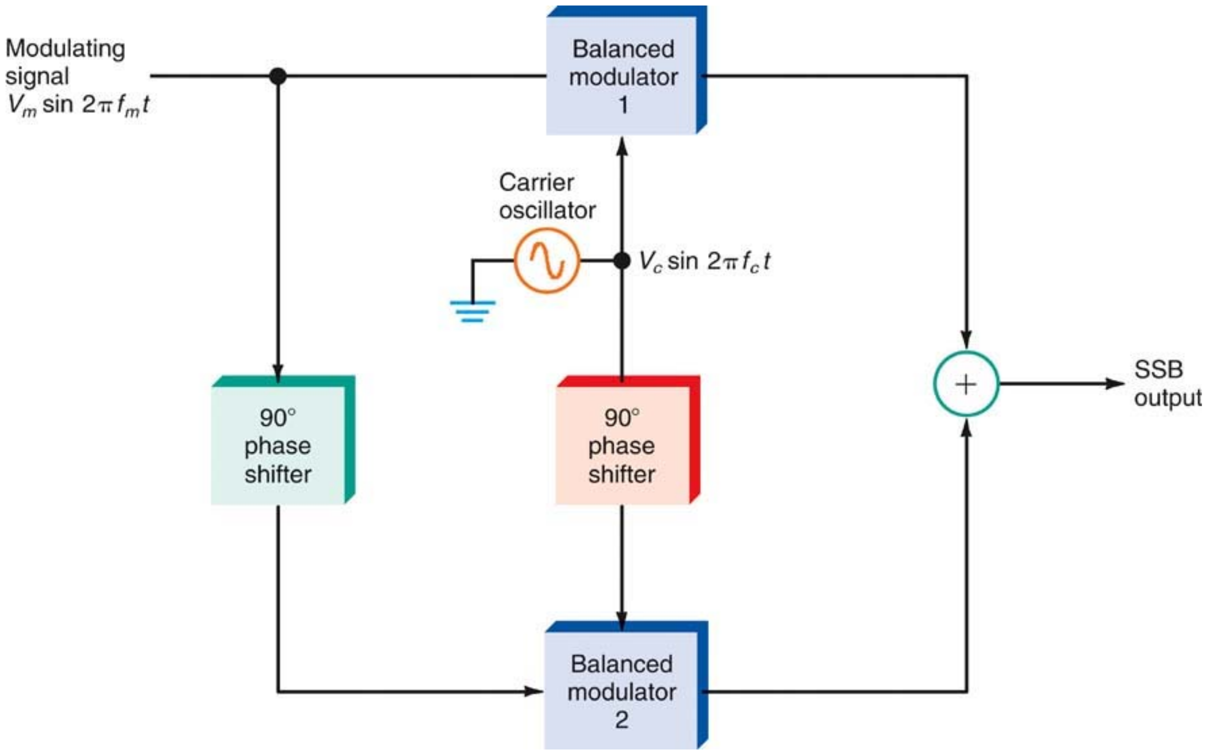
عملياً يمكننا تصميم دائرة التعديل المتوازن (الشكل 5- 4) باستخدام العناصر الالكترونية الظاهرة في الرسم ويمكننا إيجادها كقطعة واحدة (Chip).

لتوضيح مبدأ العمل انظر الشكل (5- 5).



الشكل (5-5)

للحصول على التعديل السعوي أحادي الجانب الترددي (Single-Side Band, SSB) تستخدم الدائرة الموضحة أدناه.

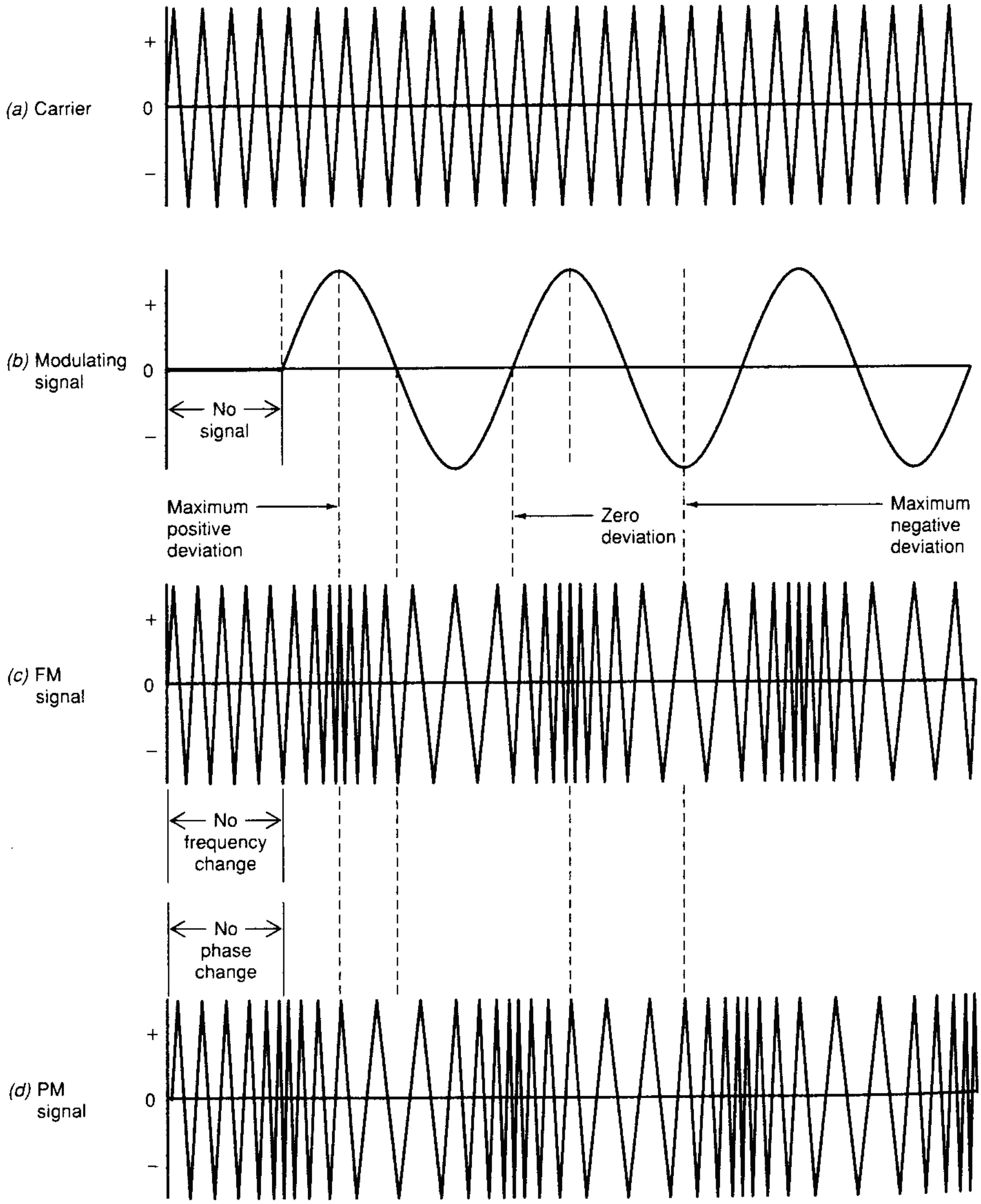


الشكل (5-6) التعديل السعوي أحادي الجانب الترددي.

5- 2 دوائر تعديل التردد FM Modulators:

في هذا النوع من التعديل سعة إشارة الحامل تبقى ثابتة دون تغيير بينما يتغير تردد الحامل وفقاً لقيمة الإشارة المراد تحميلها. كلما ارتفعت سعة إشارة المعلومة (Vm) كلما ازداد تردد الحامل عن القيمة الأساسية والعكس صحيح. كذلك يمكننا استخدام عكس ما سبق أي كلما ارتفعت سعة إشارة المعلومة (Vm) كلما نقص تردد الحامل والعكس صحيح. تنقسم دوائر تعديل التردد إلى قسمين:

- دوائر التعديل المباشر والتي تعتمد مبدأ تغيير تردد الحامل وفقاً للتغير في قيمة إشارة المعلومة
- دوائر التعديل غير المباشر عن طريق تقنيات تعديل الطور (Phase Modulation) والتي تستخدم دائرة إزاحة الطور بعد مولد إشارة الحامل.



الشكل (5 -7) تعديل التردد

لنفرض أنه لدينا إشارة الحامل على الشكل التالي:

$$carrier,\ v_c = V_c \sin 2\pi f_c t$$ (5-5)

لنفرض أنه لدينا الإشارة المراد تحميلها على الشكل التالي:

$$message,\ v_m = V_m \sin 2\pi f_m t$$ (5-6)

في حالة التعديل الترددي نحصل على العلاقة التالية:

$$v_{FM} = V_c \sin\left[2\pi\left(f_c + \Delta f \sin 2\pi f_m t\right)t\right]$$ (5-7)

حيث يتغير التردد وفقاً للعلاقة التالية:

$$f = f_c + \Delta f \sin 2\pi f_m t$$ (5-8)

ترمز (Δf) إلى أقصى تغيير في قيمة التردد وتسمى انحراف التردد (Frequency Deviation) بينما يسمى المدى الكامل لتغيير التردد من أصغر قيمة لأعلى قيمة تأرجح أو دوران الحامل (Carrier Swing). في حالة الموجة الجيبية:

Carrier Swing = 2 × Frequency Deviation

لحساب معامل التعديل m (Modulation Index):

$$Modulation\ Index = m = \frac{\Delta f}{f_m}$$ (5-9)

إذا ما قسمنا الانحراف الترددي الحقيقي على القيمة القصوى للانحراف الترددي وضربنا بمائة نحصل على نسبة التعديل (Percent Modulation):

$$Percent\ Modulation = M = \frac{\Delta f_{actual}}{\Delta f_{\max}} \times 100$$ (5-10)

يستخدم التعديل الترددي في البث الإذاعي FM في المجال الترددي من 88 MHZ ولغاية 108 MHz وذلك وفقاً للجنة الفدرالية الأمريكية للاتصالات وبمقدار انحراف ترددي 75 kHz للمحطات الإذاعية. كذلك يستخدم التعديل الترددي كتقنية تعديل للصوت في الإشارة التلفزيونية وبمقدار انحراف ترددي يساوي 25 kHz.

مثال 5- 2:

لديك حامل ترددي مقداره (107.6 MHz) تم تعديله ترددياً بموجة جيبية ذات تردد (7 kHz) علماً بأن الانحراف الترددي هو 50 kHz، أوجد:

أ- التأرجح أو دوران الحامل.

ب- أعلى وأدنى تردد للإشارة المعدلة.

جـ- معامل التعديل m.

الحل:

أ-

Carrier Swing = 2 × Frequency Deviation

= 2 × 50 kHz = 100 kHz

ب-

التردد الأعلى:

fH = fc + Δf = 107.6 MHz + 50 kHz = 107.65 MHz

التردد الأدنى:

fH = fc - Δf = 107.6 MHz - 50 kHz = 107.55 MHz

جـ-

$$Modulation\ Index = m = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{50\,kHz}{7\,kHz} = 7.143$$

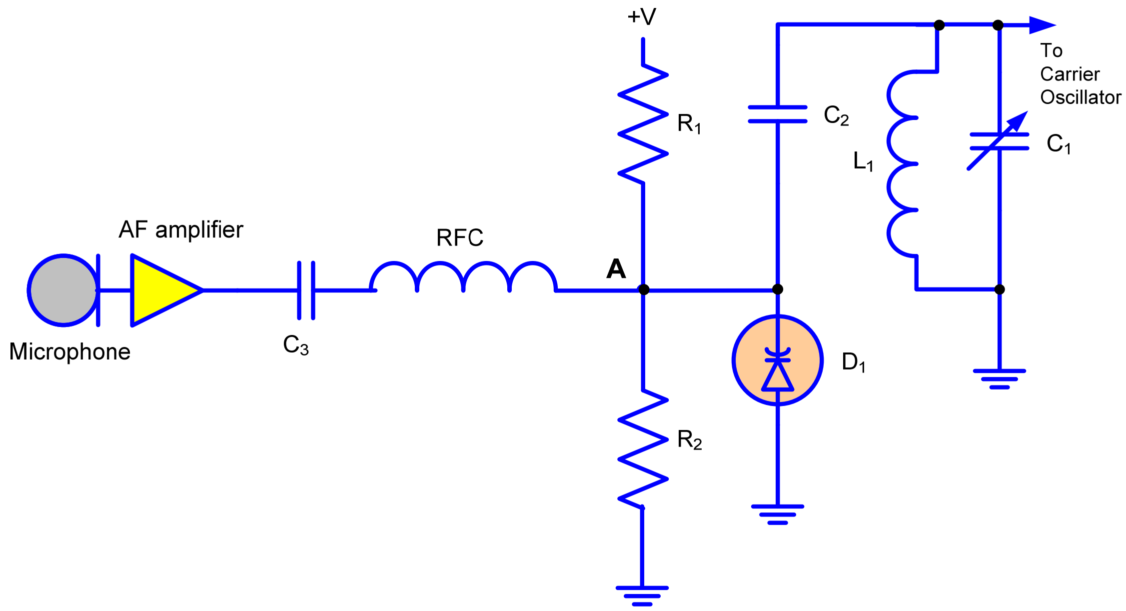
5- 2- 1 دائرة تعديل التردد باستخدام فاراكتور

Frequency Modulator with VVC

يوضح الشكل أدناه (5- 8) دائرة بسيطة للحصول على تعديل التردد (FM) باستخدام عناصر الكترونية يمكن التحكم بسعتها (Capacitance) عن طريق تغيير الجهد عليها (Voltage-variable capacitors) وتعرف اختصاراً VVC.

تتكون الدائرة من:

- ميكرفون
- مكبر صوتي (AF amplifier)
- ملف (L1) و مكثف (C1) يشكلان دائرة التوليف لمذبذب الحامل
- دايود فاراكتور D1 (Varactor Diode) موصول على التوالي مع مكثف C2 وهما على التوازي مع دائرة التوليف (L1C1). يمكننا التحكم بالسعة الكهربائية للفاراكتور من خلال الجهد المباشر (DC Bias) وإشارة المعلومة (m(t
- مقسم الجهد (Voltage Divider) مكون من R1 و R2.
- مكثف C3 يمنع DC.
- ملف الخنق RFC (Radio Frequency Choke) وهو عبارة عن ملف ذي تفاعلية عالية جداً (Reactance) على تردد الحامل لمنعه من الرجوع لدائرة إشارة المعلومة.



الشكل (5-8) دائرة تعديل التردد باستخدام فاراكتور دايود .

مبدأ العمل:

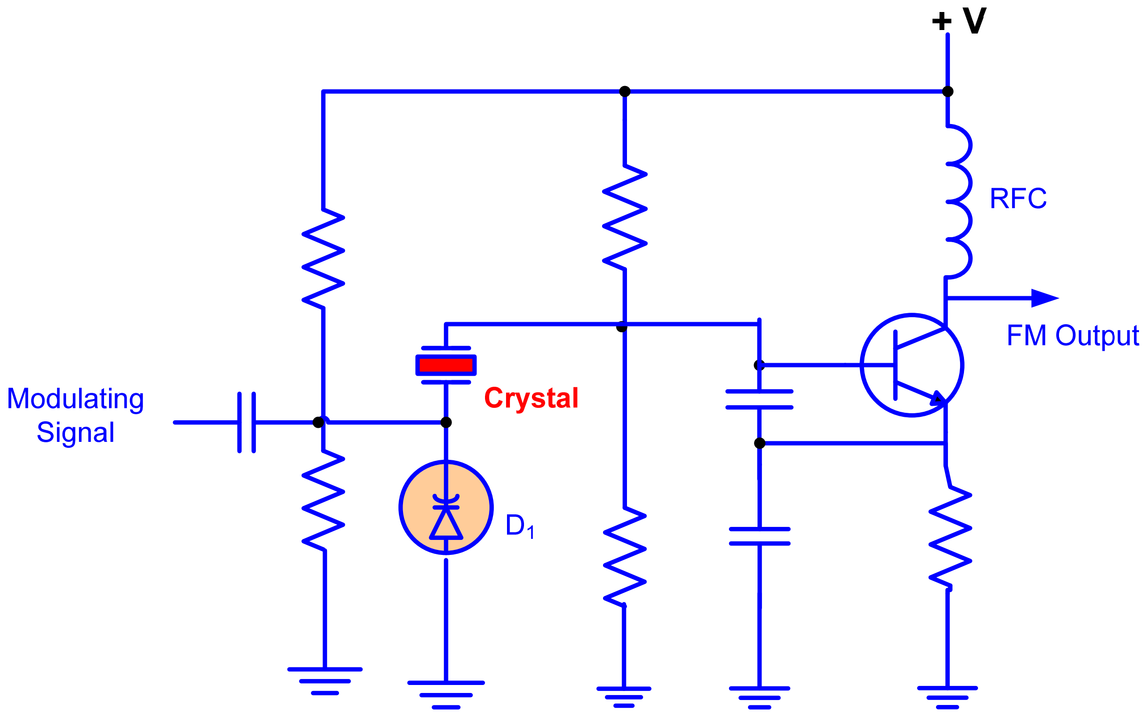
تأتي الإشارة الصوتية الضعيفة من الميكرفون حيث يتم تكبيرها عبر المكبر (AF). عندما تبدأ الإشارة بالتغير ارتفاعا أو نزولاً تتغير قيمة جهد الانحياز (زيادة أو نقصان) في النقطة (A) والتي تغذي الفاراكتور وبالتالي تتغير سعته الكهربائية وذلك وفقاً لمبدأ عمله. عندما تتغير سعته الكهربائية تتغير السعة لدائرة التوليف مما يغير تردد الحامل.

عندما تزداد قيمة إشارة المعلومة المراد تحميلها تزيد قيمة جهد الانحياز على الفاراكتور مما يؤدي إلى إنقاص سعته الكهربائية (تناسب عكسي) مما يؤدي لارتفاع قيمة التردد والعكس صحيح. إن المشكلة الأساسية لهذه الدائرة هي أن دائرة المذبذب (LC) غير مستقرة لتوليد تردد حامل ذي قيمة ثابتة حيث تتأثر بدرجات الحرارة وتغير الجهد في الدائرة، مما يستدعي استخدام المذبذب الكريستالي.

5-2-2 دائرة تعديل التردد مع المذبذب الكريستالي

Frequency Modulator of a Crystal Oscillator

يتميز هذا النوع من دوائر التعديل الشكل (5- 9) بثبات عالٍ لتردد الحامل والذي نحصل عليه من المذبذب الكريستالي. يمكننا تغيير التردد من خلال تغيير قيمة السعة الكهربائية على التوالي أو التوازي مع الكريستال.



الشكل (5-9) دائرة تعديل التردد مع المذبذب الكريستالي

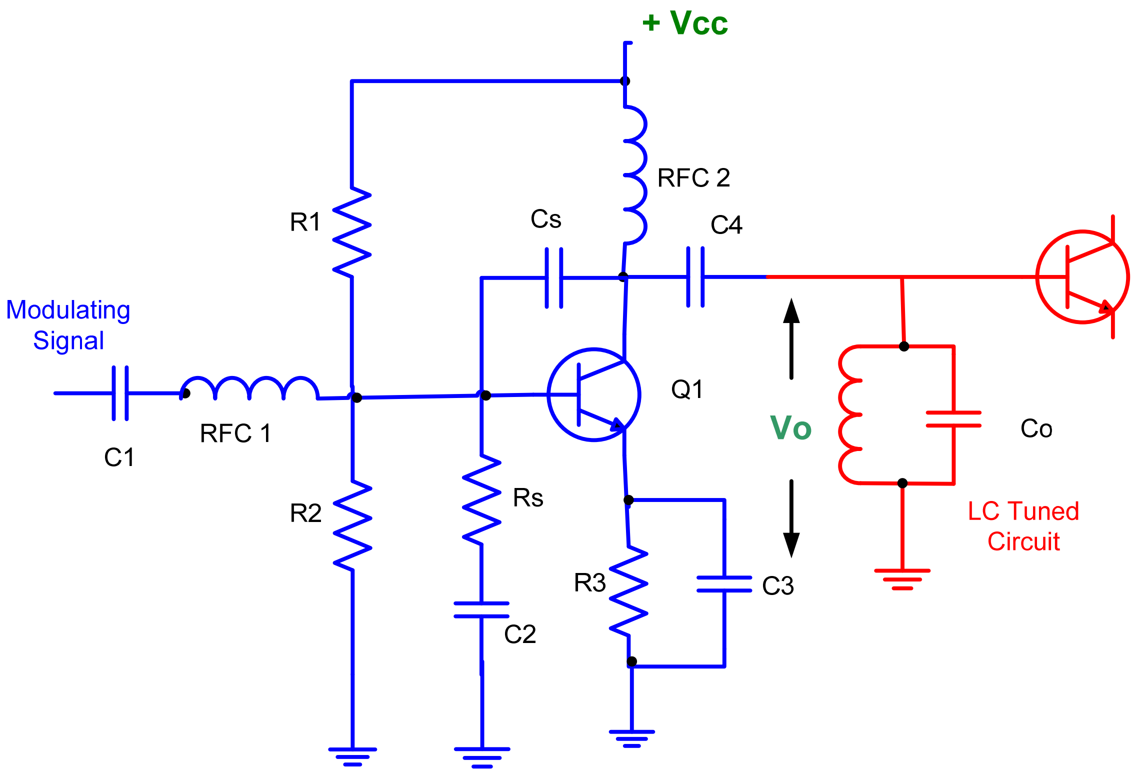
مبدأ العمل:

نقوم بتوصيل الإشارة المراد تحميلها (Modulating Signal) على الفاراكتور دايود ، عندما تتغير هذه الإشارة فإنها تقوم بتغيير سعة الفاراكتور (D1) الموصول على التوالي مع الكريستال مما يؤدي لتغيير في تردد الكريستال مقارنة بتردده الأصلي وبالتالي الحصول على التعديل الترددي.

إن السلبية الرئيسة لهذا النوع من دوائر التعديل هو عدم إمكانية الحصول على قيمة عالية للانحراف الترددي (Frequency Deviation). للحصول على قيمة عالية يجب استخدام مذبذب (LC).

3-2-5 دائرة تعديل التردد المفاعلي Reactance Frequency Modulator:

للحصول على التعديل الترددي تستخدم هذه الدائرة ترانزستور ثنائي القطبية (BJT) في حالة الباعث المشترك (Common Emitter) والذي يقوم بدور مكثف أو ملف متغير حيث يكون موصولاً على دائرة التوليف للمذبذب (الشكل 5- 10).



الشكل (5-10) دائرة تعديل التردد المفاعلي

مكونات الدائرة:

- ترانزستور Q1.
- ترانزستور Q2 ويتبع دائرة المذبذب .
- المقاومات (R1) و (R2) تشكل مقسم الجهد (Voltage Divider) للحصول على انحياز الترانزستور المطلوب.

- المقاومة (Rs)والمكثف (Cs)يشكلان دائرة إزاحة الطور (Phase Shift Circuit) للإشارة الراجعة من دائرة التوليف (LC). يتم اختيار قيمة المكثف بحيث تكون ممانعته أكبر بعشر مرات أو أكثر من المقاومة Rs .
- المكثف C2 (ذو ممانعة صغيرة على تردد التشغيل وبالتالي لا يؤثر على إزاحة الطور) موصول على التوالي مع المقاومة (Rs) ليمنع تأثير (Rs)على انحياز الترانزستور (Q1).
- المكثف (C1)يمنع الجهد المباشر (DC) من التأثير على انحياز الترانزستور (Q1)والملف (RFC1)يفصل الإشارة المراد تعديلها عن المذبذب.
- المكثف (CO)والملف (LO)يشكلان دائرة التوليف للمذبذب.
- المكثف (C4) يساعد في التوصيل بين دائرة مكبر الترانزستور(Q1)ودائرة المذبذب حيث يمنع (DC)من الوصول للملف (LO).
- المكثف (C3) والمقاومة (R3)للتحكم بعمل المكبر في حالة الباعث المشترك.
- الملف (RFC2) ذو ممانعة عالية جداً على تردد التشغيل ويقوم مكان مقاومة الجامع (Rc)

مبدأ العمل:

الفكرة الرئيسية لعمل هذه الدائرة هو الاستفادة من عمل مكبر الترانزستور (Q1)كمكثف أو ملف متغير حيث إنها موصولة مع دائرة التوليف للمذبذب وبالتالي يتم التحكم بالتردد الناتج زيادة أو نقصاناً مما يتيح الحصول على التعديل الترددي. حسبما هو موضح على الشكل (5- 10) فان إشارة المذبذب (VO) من دائرة التوليف يتم إرجاعها إلى دائرة إزاحة الطور المكونة من (Rs)و (Cs).

حسب قيمة الإشارة المراد تعديلها الداخلة على مكبر الترانزستور يتغير الجهد على قاعدة الترانزستور (Q1)وبالتالي يتغير تيار الجامع (Collector Current) للترانزستور مما يؤدي لتغيير زاوية إزاحة الطور مقارنة مع جهد إشارة المذبذب (VO). كلما تغيرت الإشارة المراد تعديلها كلما تغيرت السعة الكهربائية وبالتالي تغير التردد.

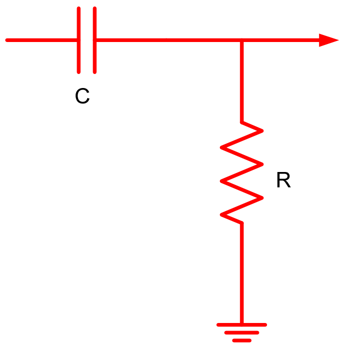
إذا قمنا بتغيير Rs و Cs مكان بعضهما البعض يصبح المكبر يتصرف كملف وبالتالي تتغير قيمة الحثّيّة مع تغير قيمة الإشارة المراد تعديلها مما يؤدي لتغيير تردد المذبذب.

يعتبر معدّل التردد المفاعلي من أفضل أنوع دوائر تعديل التردد لأنه يتيح الحصول على انحراف ترددي ضمن مجال ترددي واسع.

5- 3 دوائر تعديل الطور Phase Modulators

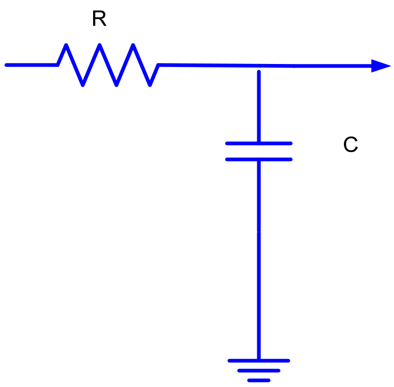
غالباً ما يستخدم في أجهزة إرسال التعديل الترددي (FM Transmitters) بعض أنواع تعديل الطور للحصول على التعديل الترددي غير المباشر (Indirect FM) وذلك لإمكانية التحكم بدقة واستقرارية مذبذب الحامل. عادة ما يستخدم المذبذب الكريستالي للحصول على تردد الحامل بشكل دقيق ومستقر، بعدها يتم التوصيل على دائرة تعديل الطور حيث يتم التحكم بتغيير إزاحة الطور وفقاً لقيمة الإشارة المراد تحميلها. حيث إن التغير في إزاحة الطور يولد تغيير في التردد وبذلك نحصل على التعديل الترددي غير المباشر.

إن أبسط أنواع دوائر إزاحة الطور هي دوائر(RC)حيث يمكننا التحكم بقيمة الزاوية من خلال تغيير قيم (R)و(C). يظهر الشكل (5- 11) دائرة (RC)حيث يسبق الخرج الناتج إشارة الدخل بزاوية من صفر لغاية (90°) وذلك حسب قيم(R)و(C).



الشكل (5- 11) دائرة إزاحة الطور(RC)

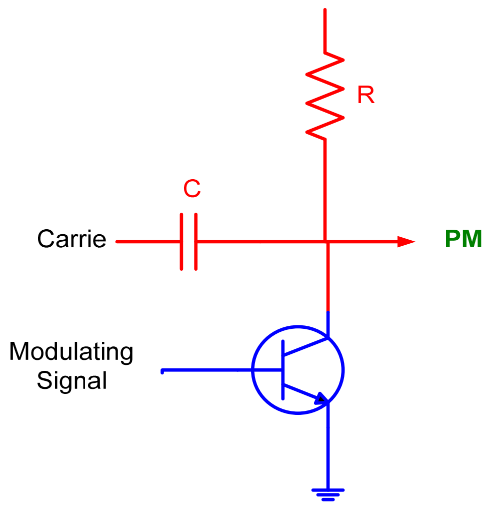
يظهر الشكل (5- 12) دائرة(RC)حيث يتأخر الخرج الناتج عن إشارة الدخل بزاوية من صفر لغاية 90° وذلك حسب قيم(R)و (C).



الشكل (5- 12) دائرة إزاحة الطور RC

5- 3 - 1 دائرة تعديل الطور باستخدام الترانزستور Transistor Phase Modulator :

لكي نستخدم دوائر(RC)البسيطة كأساس لدوائر تعديل الطور يجب أن نتمكن من جعل المقاومة(R)أو المكثف(C)يتغير وفقاً لتغير قيمة الإشارة المراد تحميلها. يظهر الشكل (5- 13) أبسط أنواع دوائر تعديل الطور وهي باستخدام ترانزستور ثنائي القطبية (BJT).



الشكل (5- 13) دائرة تعديل الطور باستخدام الترانزستور

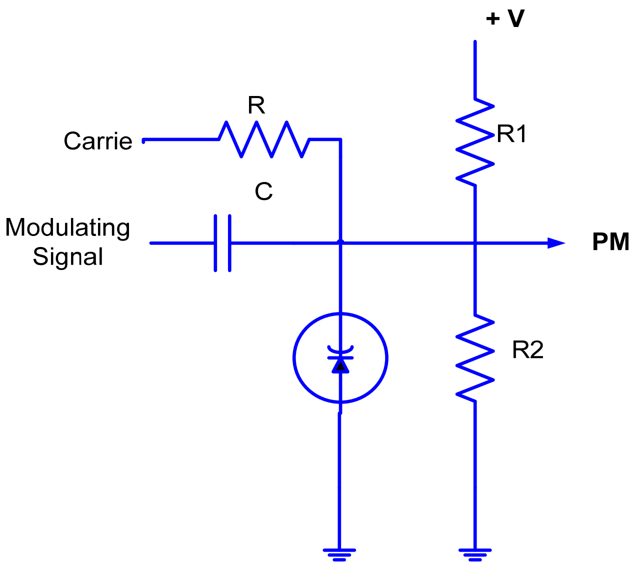
في هذه الدائرة قمنا بوضع الترانزستور مكان المقاومة(R)في الدائرة (الشكل 5- 11) وبذلك كلما زادت الإشارة المراد تحميلها كلما زاد تيار القاعدة وتيار الجامع للترانزستور مما يقلل من المقاومة الفعلية للترانزستور (Effective Transistor Resistance). كلما نقصت المقاومة زادت قيمة الزاوية مما يتسبب في زيادة التردد والعكس صحيح.

يمكننا استبدال ترانزستور ثنائي القطبية بترانزستور تأثير المجال (FET).

5- 3 - 2 دائرة تعديل الطور باستخدام الفاراكتور Varactor Phase Modulator

يظهر الشكل (5- 14) دائرة تعديل الطور باستخدام فاراكتور دايود حيث تتغير سعته وفقاً للجهد الواصل عليه.

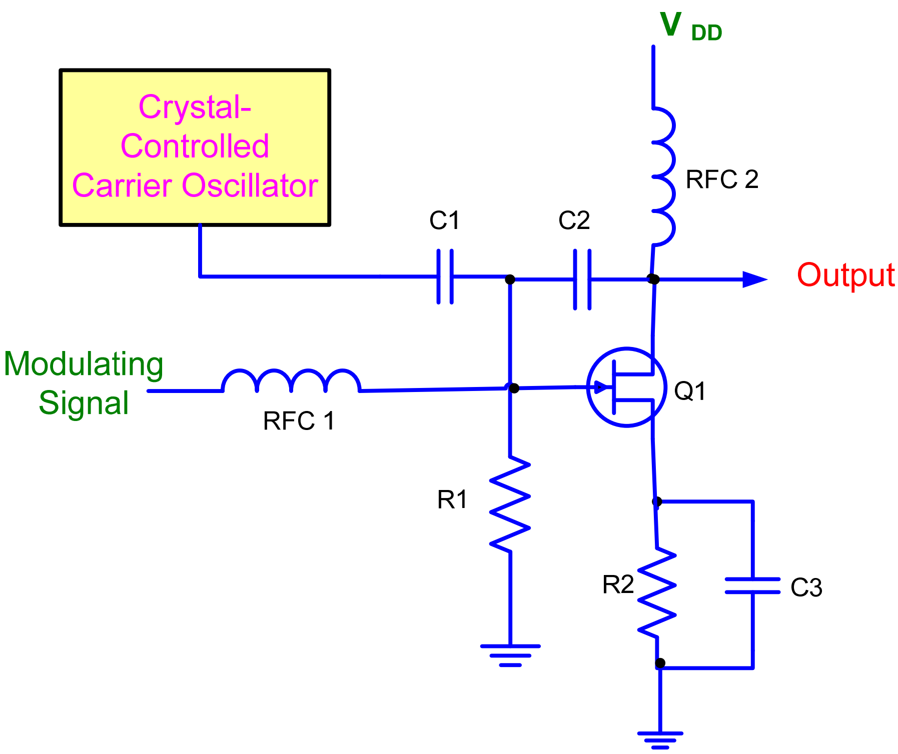
كلما زادت الإشارة المراد تحميلها كلما زاد تيار الجهد الواصل على الفاراكتور الواصل أصلاً عن طريق مقسم الجهد المكون من(R1)و (R2)وبالتالي تنقص قيمة السعة الكهربائية له (تناسب عكسي) مما يزيد من قيمة التفاعلية السعوية وبالتالي إلى نقصان زاوية إزاحة الطور والعكس صحيح.



الشكل (5- 14) دائرة تعديل الطور باستخدام الفاراكتور

5- 3 - 3 دائرة تعديل الطور المطورة Improved Phase Modulator

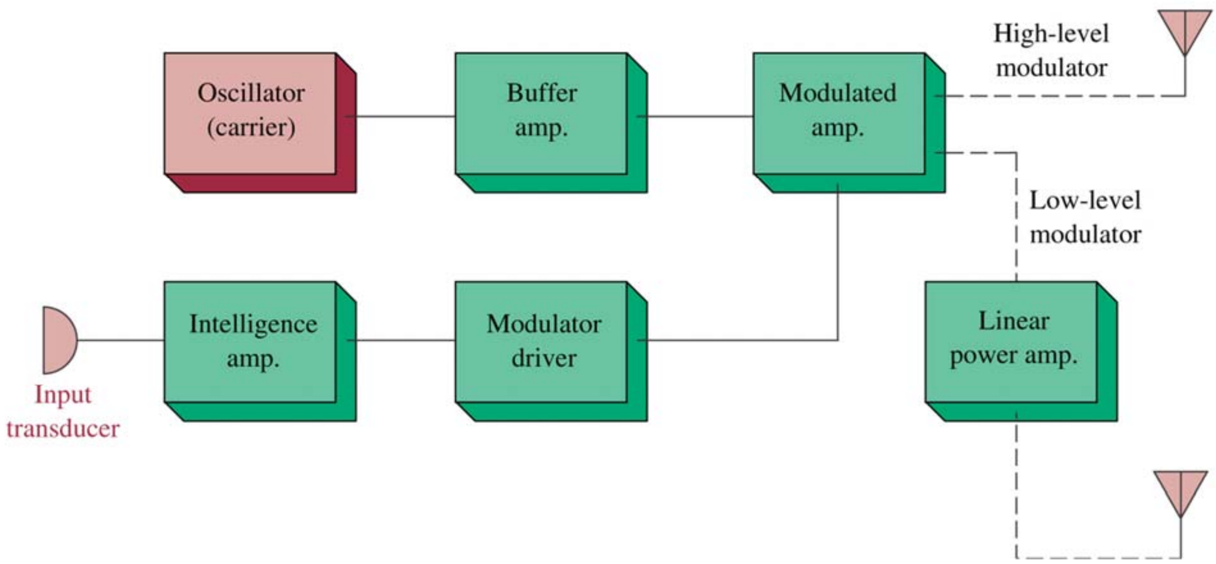
تتألف هذه الدائرة الشكل (5- 15) من دائرة إزاحة الطور (Phase Shifter) المكونة من المكثف (C3) والمقاومة المتغيرة لترانزستور تأثير المجال (FET). تردد الحامل يتم الحصول عليه من دائرة مذبذب كريستالي ويتم توصيله إلى مخرج الدائرة من خلال المكثفات(C1)و (C2). أيضاً يتم توصيل الحامل إلى بوابة (Gate) الترانزستور عبر المكثف (C1). يتم توصيل الإشارة المراد تحميلها على بوابة الترانزستور حيث يقوم الملف (RFC1) بعزل تردد الحامل عن دائرة الصوت. تقوم الإشارة الداخلة بالتحكم بتيار الترانزستور بالإضافة إلى الجهد الموجود على المقاومة(R1)والذي يتحكم بتيار الترانزستور أيضاً. سوف تتغير إشارة الحامل التي تظهر على المخرج (FET Drain) بالنسبة للسعة والطور. عادة ما يتناسب مقدار ناتج التغير في الطور مع قيمة الإشارة المراد تحميلها (Modulating Signal).



الشكل (5- 15) دائرة تعديل الطور المطورة

5- 4 أجهزة الإرسال Transmitters:

يقوم جهاز الإرسال بأخذ المعلومات المراد إرسالها وبتحويلها إلى موجات كهرومغناطيسية تتناسب مع وسط الانتشار أو النقل. تتطلب هذه العملية توليد تردد الحامل، إجراء عملية التعديل، والتكبير. بعد ذلك يتم توصيل هذه الإشارات عبر خطوط نقل إلى هوائي الإرسال الذي يقوم ببثها عبر الأثير. هنالك أشكال كثيرة لدوائر الإرسال نقدم واحدة منها على الشكل (5- 16).



الشكل (5- 16) نموذج جهاز إرسال

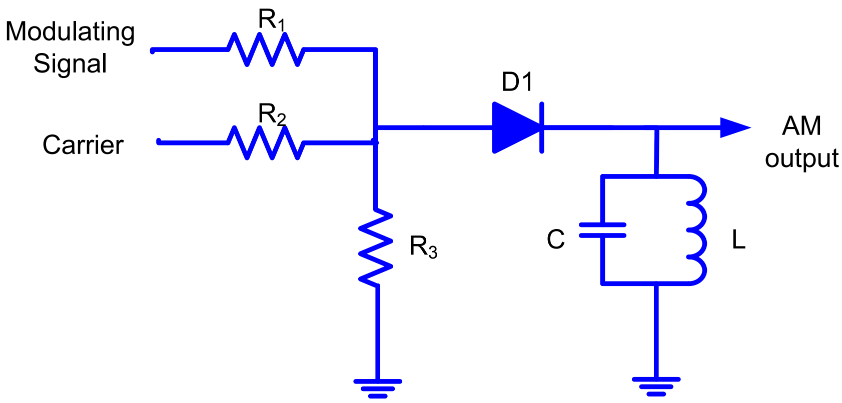
مكونات الدائرة:

- محوّل الصوت Input Transducer (microphone).
- مذبذب الحامل Oscillator (carrier).
- مكبر الموائمة Buffer Amplifier.
- مكبر التعديل Modulated Amplifier.
- مكبر المعلومات المراد إرسالها Intelligence Amplifier.
- مشغل دائرة التعديل Modulator Driver.
- مكبر القدرة الخطي Linear Power Amplifier.

يتضح من الشكل أعلاه أن هنالك نموذجين للإرسال، أحدهما عالي المستوى (High Level Modulator) والآخر منخفض المستوى (Low Level Modulator) حيث يلزم في هذه الحالة إدخال الإشارة المعدّلة على مكبر القدرة الخطي قبل إيصالها للهوائي.

أسئلة وتمارين

من الشكل أدناه، أجب على الأسئلة التالية:



الشكل (5- 17)

1- إشارة الحامل والإشارة المراد تحميلها يحصل لهما عملية:

ا- ضرب

ب- جمع

جـ- قسمة

د- طرح

2- وظيفة الصمام الثنائي D1:

أ- شاحن

ب- مقاومة متغيرة

جـ- جامع

د- موحّد

3- وظيفة دائرة (LC)على المخرج:

أ- مرشح

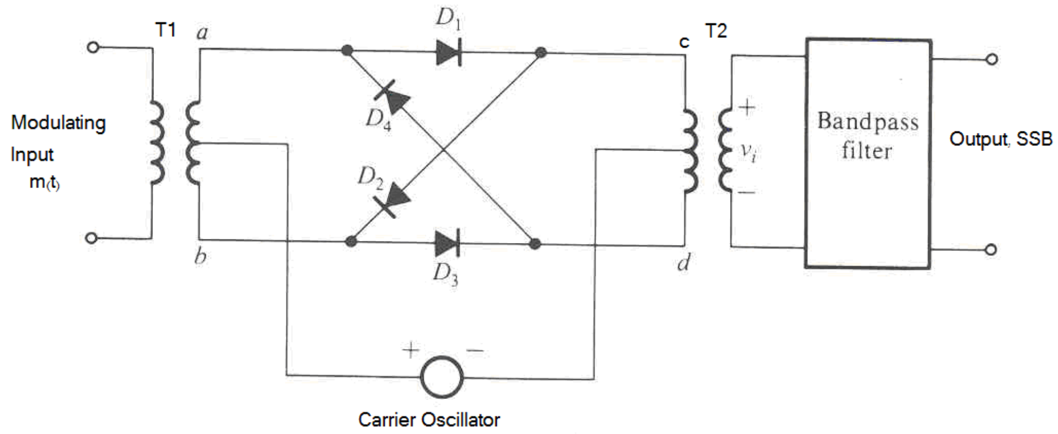
ب- موزع جهد

جـ- دائرة توليف

د- أ و ت

4- لديك إشارة صوتية ذات نطاق ترددي من(300 Hz)ولغاية (3.4 kHz) يلزمنا تحميلها على تردد (800 kHz) باستخدام التعديل السعوي (AM). أوجد ترددات النطاق الجانبي الأعلى والأدنى.

من الشكل أدناه، أجب عن الأسئلة التالية:

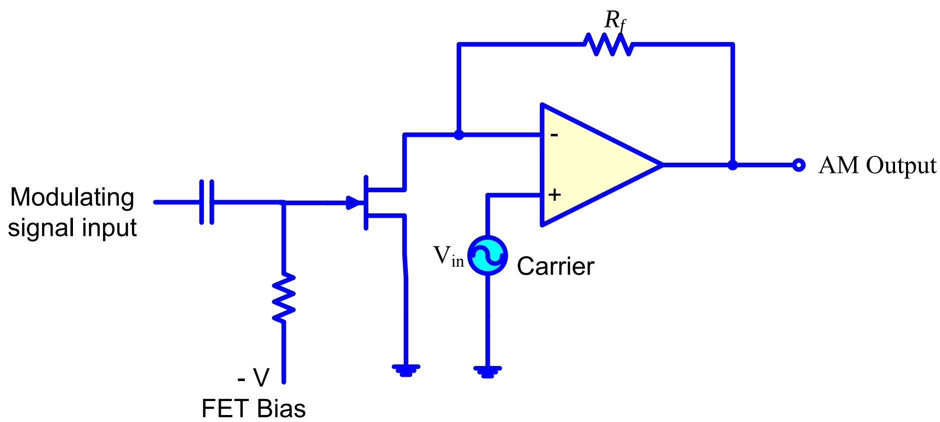


الشكل (5-18)

5- وضح بالرسم مسار التيارات خلال الصمامات الثنائية في حالة الإشارة m(t) لا تساوي الصفر وقطبية إشارة الحامل كما هو موضح على الرسم.

6- وضح بالرسم مسار التيارات خلال الصمامات الثنائية في حالة الإشارة m(t) لا تساوي الصفر وقطبية إشارة الحامل عكس ما هو موضح على الرسم.

من الشكل أدناه، أجب عن الأسئلة التالية:



الشكل (5-19)

7- ما هي وظيفة كل من المكثف على المدخل والمقاومة Rf ؟

8- ما هي وظيفة الترانزستور JFET في الدائرة.؟

9- احسب معامل التكبير إذا علمت أن Rf = 1 kΩ و قيمة Ri = 100 Ω

10- لديك إشارة معدلة ترددياً والتي تم تعديلها باستخدام إشارة صوتية جيبية ذات تردد(3 kHz)علماً بأن التردد الأعلى(100.02 MHZ) والتردد الأدنى(99.98 MHz).

أوجد:

أ- تردد الحامل.

ب- الانحراف الترددي (Δf).

جـ- معامل التعديل m.

11- لديك إشارة تلفزيونية تم استخدام تعديل التردد لإرسال الصوت الملازم لها (أقصى تردد للصوت 15 kHz)، إذا علمت أن الموجة الحاملة ذات تردد(95.75 MHz) وأقصى انحراف ترددي(25kHz).

أوجد:

أ- معامل التعديل

ب- حيز التردد المشغول

دوائر إزالة التعديل

6

الجدارة: القدرة على التعامل مع دوائر إزالة التعديل التماثلي بأنواعها الرئيسة.

الأهداف: بعد دراسة هذه الوحدة يكون المتدرب قادراً على:

- أن يتعرف المتدرب على دوائر إزالة التعديل التماثلي
- أن يتعرف المتدرب على دوائر إزالة تعديل السعة
- أن يتعرف المتدرب على دوائر إزالة تعديل التردد
- أن يتعرف المتدرب على دوائر الخلط
- أن يقارن المتدرب بين نظام AM ونظام FM

الوقت المتوقع للتدريب: 4 ساعات.

دوائر إزالة التعديل

Demodulation Circuits

مقدمة :

إن الوظيفة الأساسية لدوائر إزالة التعديل والتي تسمى أيضاً دوائر الكشف (Detectors) هو استقبال الإشارة المعدّلة واسترجاع الإشارة التي تم تحميلها أثناء عملية التعديل. تعتبر دوائر إزالة التعديل العنصر الرئيس والأساسي في دوائر الاستقبال. هنالك أنواع كثيرة من دوائر إزالة التعديل والتي سنتعرف على أهمها في الأجزاء القادمة.

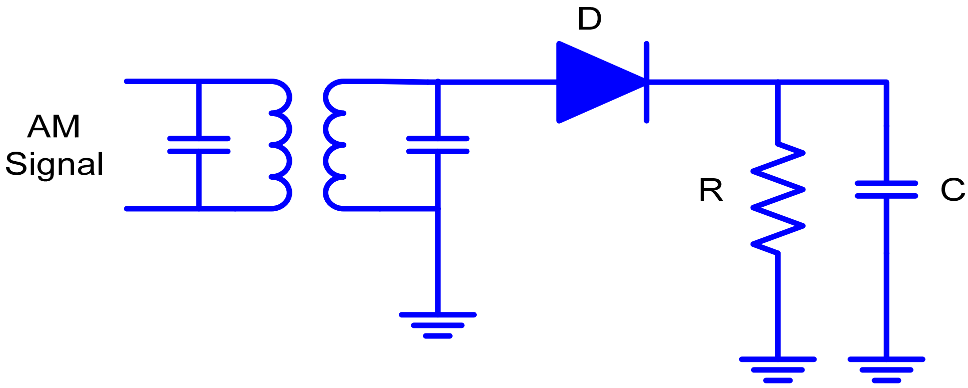
6- 1 دوائر إزالة تعديل السعة AM Demodulators

سوف نتناول في هذا الجزء التعرف على عدد من دوائر إزالة تعديل السعة مع توضيح مكوناتها ومبدأ عملها.

6- 1- 1 كاشف الصمام الثنائي Diode Detector :

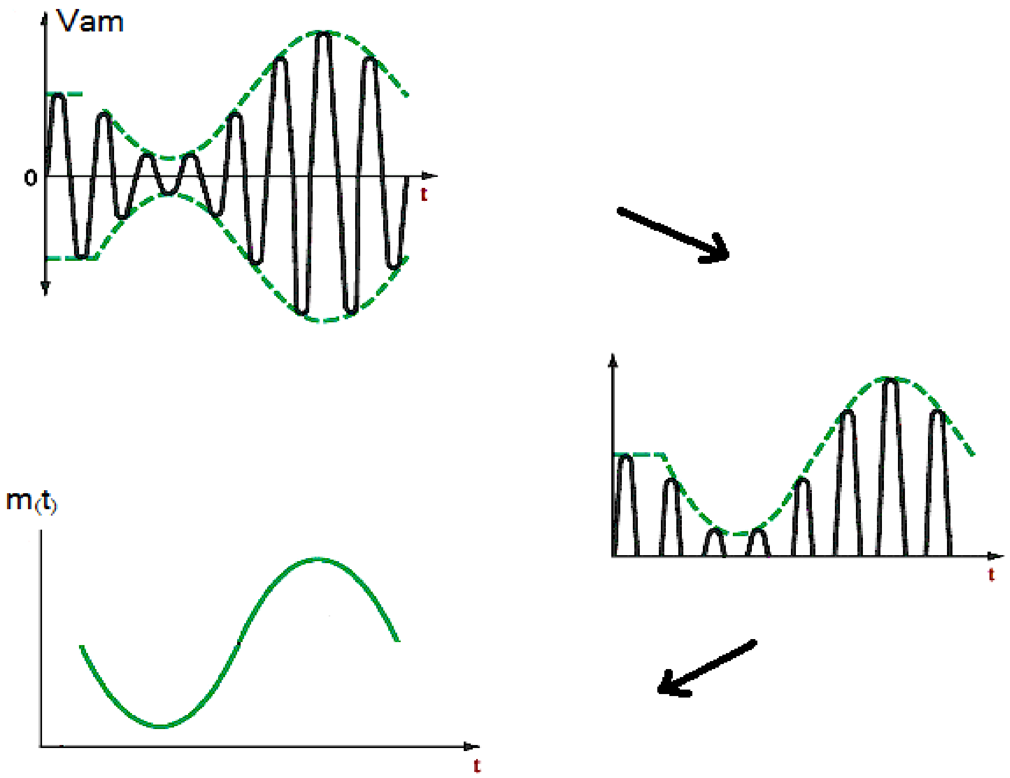
تعتبر هذه الدائرة (الشكل 6- 1) الأبسط والأكثر انتشاراً بين دوائر إزالة تعديل السعة والتي تعتمد أساساً على استخدام الصمام الثنائي مع المقاومة لتشكيل موحد نصف الموجة (Half-Wave Rectifier). يتم توصيل الإشارة المعدّلة سعوياً (AM Signal) عبر محوّل (Transformer) حيث يقوم الصمام الثنائي بتمرير الإشارة عندما تكون موجبة ويمنعها عندما تكون في الجزء السالب حيث يكون الصمام في حالة الانحياز العكسي وبالتالي فان الإشارة على المقاومة(R)عبارة عن سلسلة من النبضات الموجبة ذات ارتفاعات متغيرة وفقاً لقيمة الإشارة الأصلية.

لإرجاع الإشارة التي تم تحميلها يلزمنا توصيل مكثف مع المقاومة على التوازي. عند اختيار قيمة المكثف يجب مراعاة أن تكون ممانعة المكثف صغيرة على تردد الحامل مما يسمح بترشيح (تمرير) الحامل عبر المكثف وبالتالي الإبقاء على الإشارة الأصلية (ذات التردد الأقل) التي تم تحميلها على الحامل.



الشكل (6- 19) كاشف الصمام الثنائي

ملاحظة: يجب مراعاة أن يكون الثابت الزمني (Time Constant τ = RC) للمكثف والمقاومة أطول من دورة إشارة الحامل (Carrier Period). في هذه الحالة يقوم المكثف بعملية التفريغ أثناء فترة توقف الصمام الثنائي، عندما تظهر نبضة جديدة يبدأ المكثف بالشحن لقيمته القصوى.

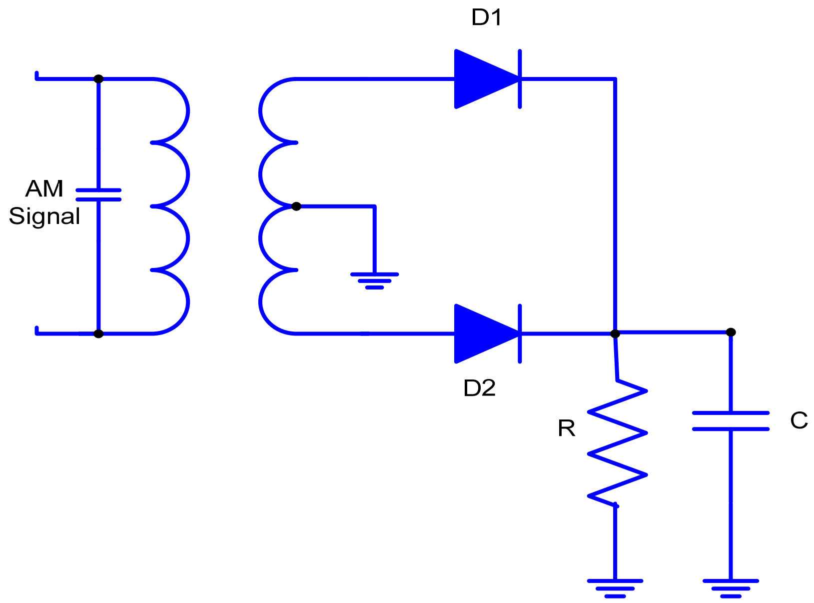


الشكل (6- 2) توضيح عمل كاشف الصمام الثنائي

كما هو موضح على الشكل (6- 2)، فإن هذا الكشف يقوم بإرجاع الإطار أو الغلاف الخارجي للإشارة لذلك يسمى كاشف الغلاف (Envelope Detector).

6- 1- 2 كاشف الصمام الثنائي كامل الموجة Full-Wave Diode Detector

لتحسين أداء كاشف الصمام الثنائي يتم استخدام دائرة موحد كامل الموجة(Full-Wave Rectifier) كما هو موضح على الشكل (6- 3).



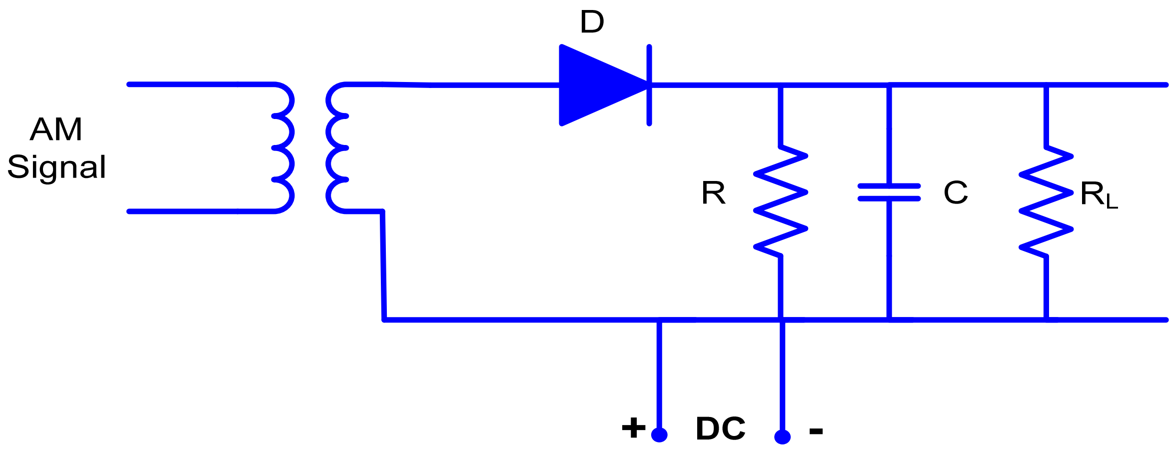
الشكل (6- 3) كاشف الصمام الثنائي كامل الموجة

في هذه الدائرة يقوم الصمام الثنائي الأول(D1)بالتوصيل خلال النصف الموجب من الإشارة بينما يقوم الآخر(D2) بالتوصيل خلال النصف السالب وبالتالي ينتج إشارة أعلى مما يسهل عملية ترشيحها باستخدام المرشح. يجب التنويه هنا إلى أن قيمة المكثف اللازم للتخلص من تردد الحامل هي نصف قيمة المرشح في الدائرة السابقة.

إن أهم عيوب الكواشف باستخدام الصمام الثنائي هي عدم موائمتها مع الترددات العالية للإشارات المراد تحميلها ، ضياع جزء من القدرة في الدائرة ، لا يوجد تكبير في الدائرة وكذلك ظهور بعض التشوهات التي تؤثر في استقبال الإشارات. لكن تبقى هذه الدوائر هي الأبسط ولذلك تجد انتشاراً واسعاً.

6- 1- 3 الكاشف باستخدام قانون التربيع Square - Law Detector

يتميز هذا النوع من دوائر إزالة التعديل باستخدام الجزء المنحني من منحنى خواص الصمام الثنائي مما يسمح بالحصول على تغيير كبير بقيمة التيار الناتج مما يحسن كفاءة الكاشف. إن استخدام الصمام الثنائي بهذه الطريقة هو ما يسمى الكشف باستخدام قانون التربيع. يظهر الشكل (6- 4) دائرة إزالة التعديل باستخدام قانون التربيع. لوضع الجهد المستمر (DC) للموجة المعدّلة في الجزء المنحني من خواص الصمام الثنائي يلزمنا توصيل جهد مستمر كما هو موضح على الشكل.



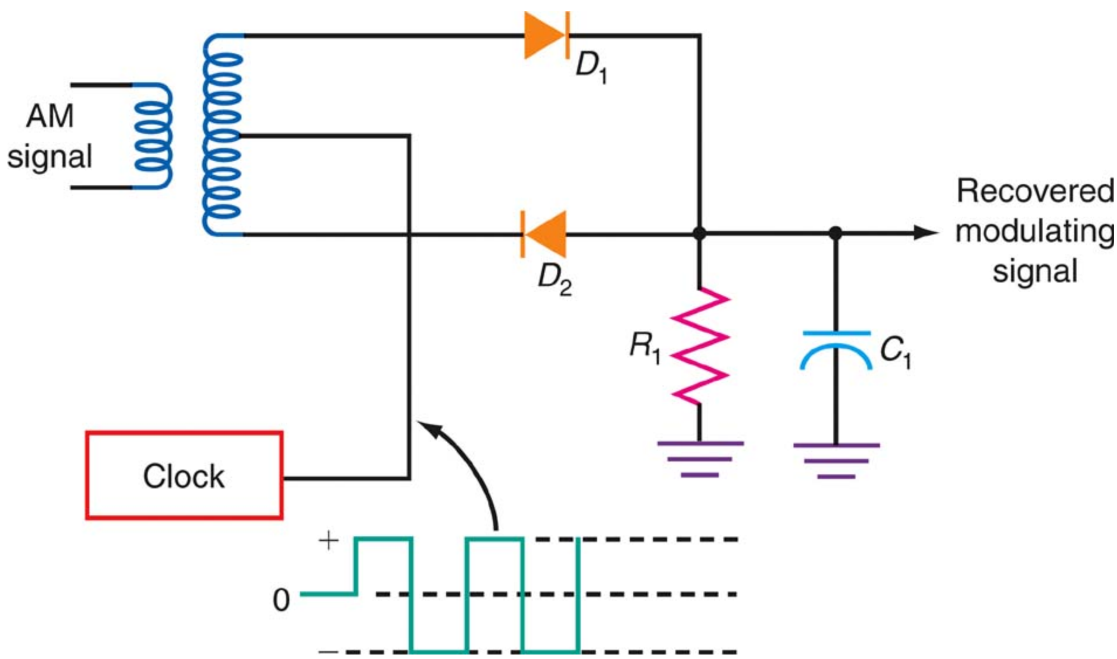
الشكل (6- 4) الكاشف باستخدام قانون التربيع

يجب مراعاة اختيار قيم المكثف(C)والمقاومة(RL)بحيث يكون الثابت الزمني مناسباً لتردد إشارة التعديل.

6- 1- 4 الكاشف المتزامن Synchronous Detector

يتميز هذا النوع من الكواشف بأداء أفضل من كاشف الصمام الثنائي الذي درسناه سابقاً حيث يصاحبه تشويه أقل (Distortion) وبالتالي يسمح بالحصول على قيمة أعلى لنسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR). لكن في هذه الحالة يلزمنا استخدام دائرة منظم زمني داخلي (Internal Clock)

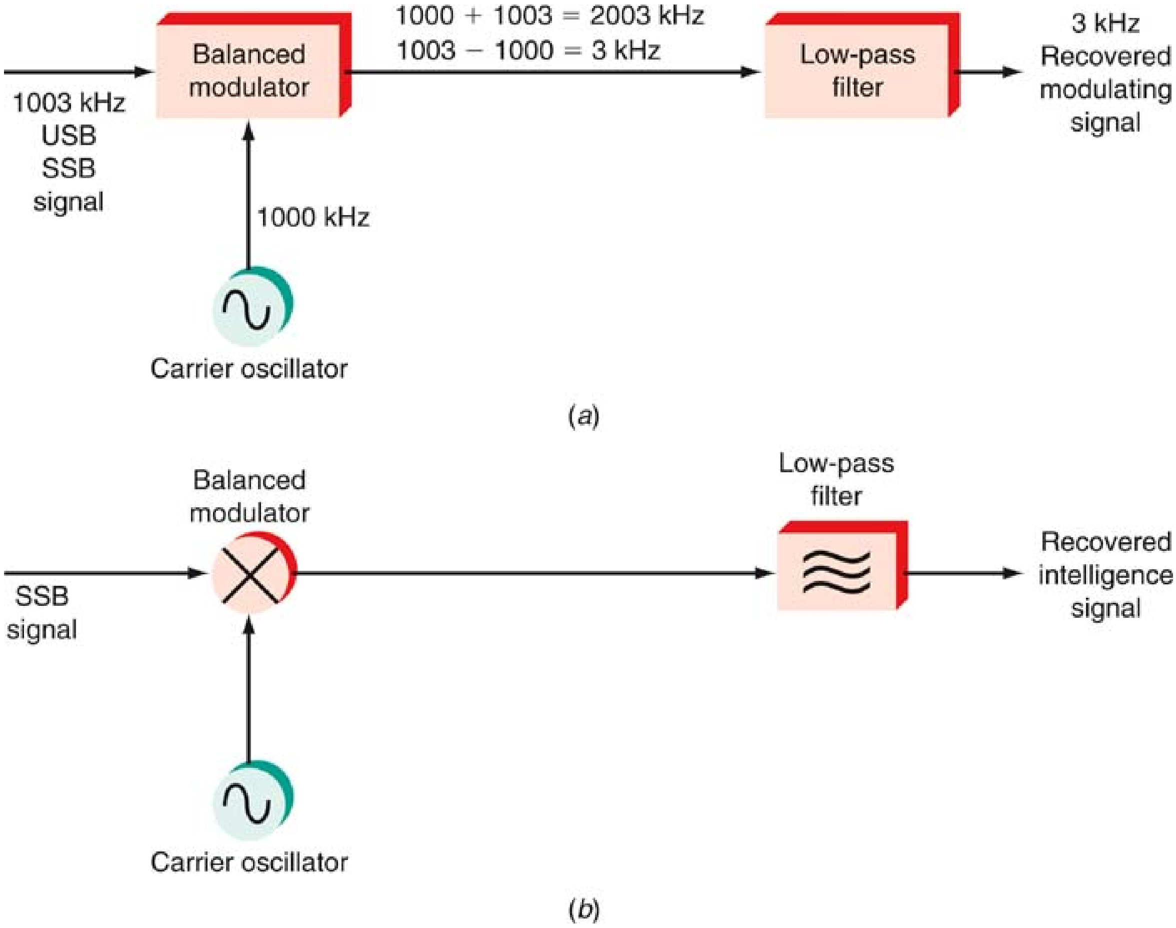
في جهاز الاستقبال بتردد مساوٍ لتردد الحامل وذلك لتنظيم عمل الكاشف (ON and OFF) للتمكن من استرجاع الإشارة الأصلية التي تم تحميلها على الحامل. يظهر الشكل (6- 4) دائرة كاشف متزامن باستخدام الصمام الثنائي.



الشكل (6- 4) الكاشف المتزامن

تعمل هذه الدائرة كسابقتها وما يميزها هو وجود دائرة المنظم الزمني والتي هي عبارة عن مولد ذبذبات مربعة ذات دقة واستقرار عالٍ بتردد يساوي تردد الحامل.

في حالة نظام التعديل أحادي الجانب الترددي (Single-Side Band) والذي يعرف اختصاراً (SSB) يستخدم ما يسمى كاشف الناتج (Product Detector) والذي يعتمد استخدام دائرة التعديل المتوازن (Balanced Modulator). لتوضيح ذلك مع الأرقام انظر الشكل (6- 5).



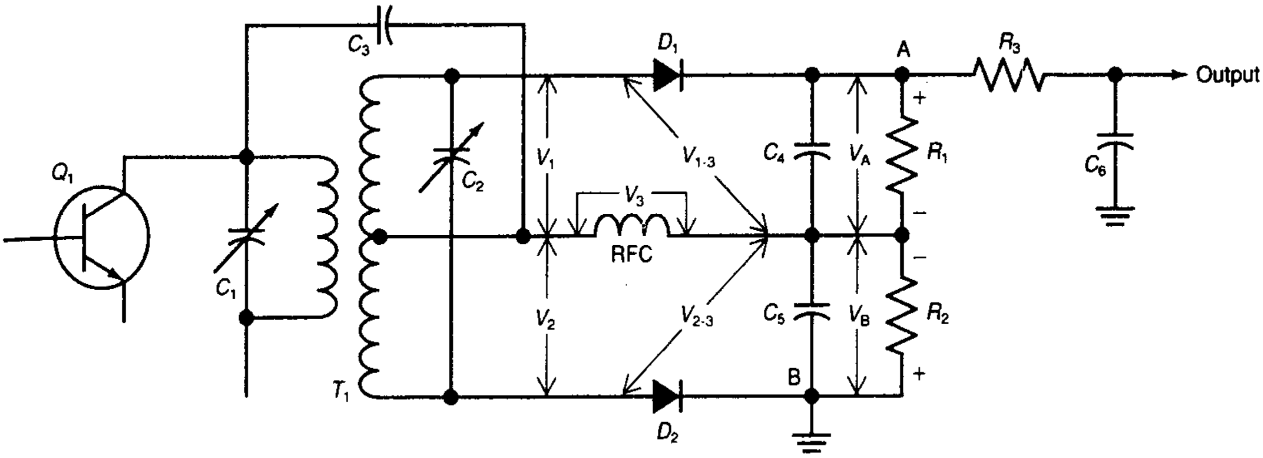
الشكل (6-5) آلية عمل كاشف الناتج

6- 2 دوائر إزالة تعديل التردد **FM Demodulators**:

تتم عملية إزالة التعديل الترددي أو تعديل الطور من خلال تحويل التغير في التردد إلى تغير في الاتساع لتعبر عن الإشارة الناتجة من إزالة التعديل. سوف نتناول في هذا الجزء دراسة أهم الأنواع.

6- 2- 1 المميّز من نوع فوستر سيلي Foster-Seeley Discriminator:

تعتبر هذه الدائرة من أكثر الدوائر انتشاراً لإزالة تعديل التردد حيث تتكون من جزئيين، الأول لتحويل الانحراف الترددي إلى تغير في السعة والثاني شبيه بدائرة إزالة تعديل السعة ويتكون بشكل رئيس من صمامين ثنائيين (الشكل 6- 5).



الشكل (6- 5) المميّز من نوع فوستر سيلي

مبدأ العمل:

يتم إدخال الإشارة المعدلة ترددياً (FM Signal) إلى المحول (T1) حيث إن الملفين الأولي والثانوي موصولان مع مكثفين(C1)و(C2)على لتحقيق الرنين على تردد مساوي لتردد الحامل. الملف الأولي للمحول موصول مع الجامع للترانزستور (Q1) والذي يقوم بإزالة التغييرات في سعة إشارة (FM). أيضاً الإشارة من الملف الأولي يتم توصيلها عبر المكثف (C3)إلى الملف (RFC) والتي تصل بنفس القيمة (V3).

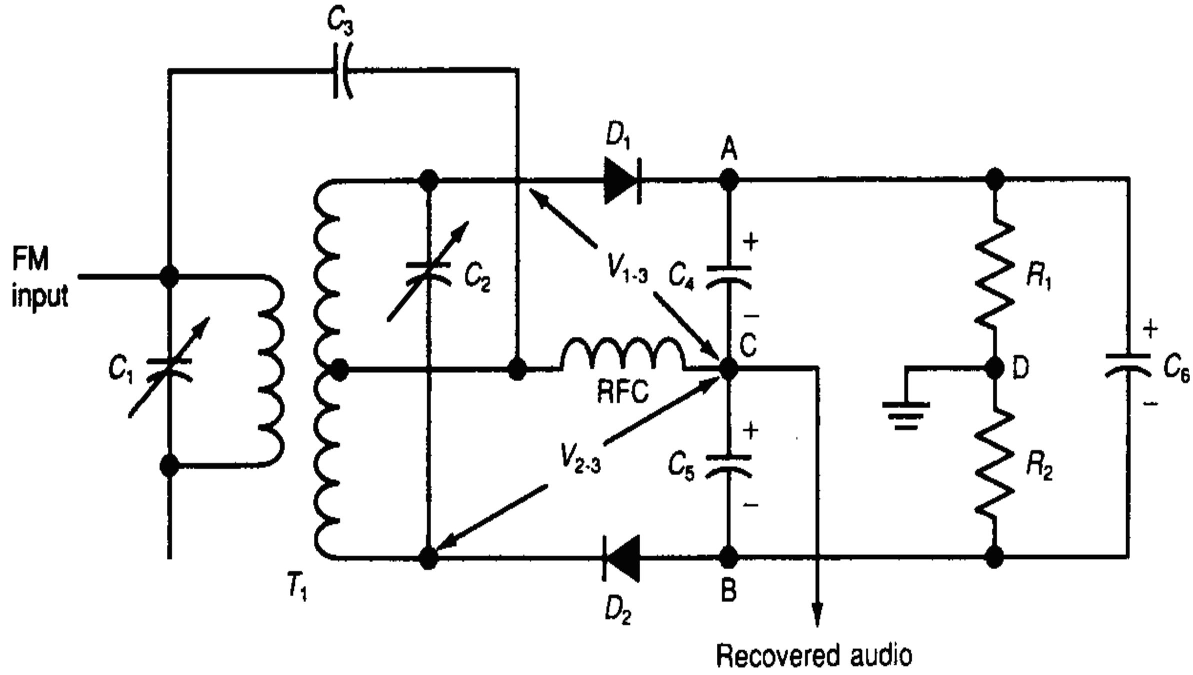
إن التيار المار بالملف الأولي للمحول يتسبب بتشكيل جهد على الملف الثاني للمحول والذي سينقسم لقسمين، علوي (V1) وسفلي (V2) بينهما فرق في الطور بمقدار °180، كذلك فان الفرق في الطور بين الجهد على الملف الأولي والثانوي للمحول هو °90.

عندما يتغير تردد الإشارة المعدلة تردديا تتغير حالة الرنين للملف الثانوي للمحول، فعندما يزداد التردد فان التفاعلية الحثية تصبح أكبر من التفاعلية السعوية (XL > XC) مما يجعل طبيعة الدائرة حثّية مما يؤدي لتغيير علاقة الطور بين(V1) و(V2)بالمقارنة مع(V3)والتي تنعكس في النهاية على ظهور جهد على(R1)أعلى من الجهد على(R2)مما يعطي جهداً موجباً على مخرج الدائرة. يحدث العكس تماماً في حالة نزول التردد.

في النهاية يمكننا تلخيص فكرة عمل الدائرة كالتالي: عندما ينحرف التردد (في نظام FM) عن التردد المركزي فان الجهد في النقطة (A)(انظر الدائرة) يزداد ويتناقص مما يتيح لنا استرجاع الإشارة الأصلية التي تم تعديلها.

6- 2- 2 كاشف النسبة Ratio Detector :

يتميز هذا النوع من دوائر إزالة التعديل عن النوع السابق كما هو موضح على الشكل (6- 6) حيث تم عكس توصيل الصمام الثنائي الثاني(D2)مقارنة مع دائرة المميز السابقة وتم توصيل المكثف ذو القيمة العالية جداً(C6). يجب التنويه إلى أن المقاومات(R1) و (R2) والمكثفات (C4)و (C5)تشكل مع بعضها دائرة قنطرة (Bridge Circuit) حيث يتم الحصول على إشارة الخرج من نقطة الوسط (C).



الشكل (6- 6) كاشف النسبة

يتم توصيل الإشارة المراد تحميلها (إشارة التعديل) على الملف الأولي للمحول T1 كذلك تمرر عبر المكثف (C3)إلى الملف (RFC).

مبدأ العمل:

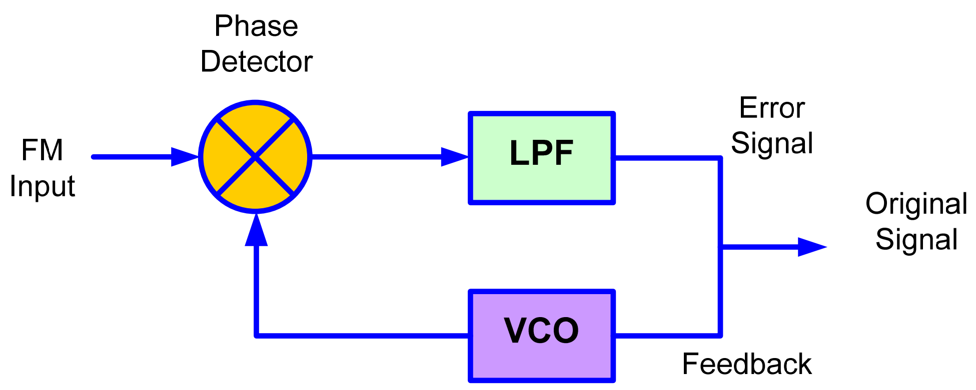
- عندما لايكون تعديل للحامل فإن الجهد على الصمام الثنائي(D1) و(D2)متساوي القيمة هذا يعني أن المكثفين (C4)و(C5)سوف يشحنان لنفس القيمة والقطبية والجهد على المقاومتين(R1) و(R2)متساوٍ القيمة مما يجعل دائرة القنطرة في حالة التوازن وبالتالي فان الجهد بين(C)و(D)يكون صفر. المكثف (C6)يقوم بالشحن إلى مجموع قيمة الشحن على(C4)و(C5) كونه موصولاً على التوازي معهم.

- إذا ما ارتفع التردد سوف تتغير علاقة الطور في الدائرة، حيث يصبح الجهد على(C4)أعلى منه على (C5) بينما يبقى الجهد على المقاومتين (R1) و(R2)متساوي القيمة لأن قيمة الشحن على المكثف (C6)لم تتغير وبالتالي فان دائرة القنطرة في حالة عدم التوازن مما يؤدي لظهور جهد على الخرج بين النقطتين (C)و(D).

- إذا ما تناقص التردد سوف تتغير علاقة الطور في الدائرة، حيث يصبح الجهد على(C5)أعلى منه على(C4) بينما يبقى الجهد على المقاومتين R1 و R2 متساوي القيمة لأن قيمة الشحن على المكثف(C6)لم تتغير وبالتالي فان دائرة القنطرة في حالة عدم التوازن مما يؤدي لظهور جهد بين النقطتين (C)و(D)بعكس قطبية الجهد الذي ظهر على الخرج في الحالة السابقة.

6- 2- 3 حلقة الطور المغلقة Phase-Locked Loop (PLL) :

تعتبر هذه الدائرة من أفضل دوائر كشف تعديل التردد وهي عبارة عن دائرة تحكم تغذية راجعة تتحسس في عملها للتردد أو الطور. تتكون جميع الدوائر من هذا النوع من ثلاثة أجزاء (الشكل 6- 7):



الشكل (6- 7) دائرة حلقة الطور المغلقة

- كاشف الطور أو دائرة الخلط Phase Detector or Mixer

- دائرة المذبذب VCO

- مرشح التردد المنخفض Low-Pass Filter ذو تردد قاطع(fc) يسمح بمرور تردد إشارة التعديل m(t).

مبدأ العمل:

يتم توصيل إشارة(FM)على كاشف الطور حيث يقوم بمقارنتها مع الإشارة الراجعة إليه من دائرة التغذية الراجعة حيث تتولد إشارة تقوم بعد مرورها عبر المرشح بالتحكم بعمل المذبذب (VCO) حيث يتغير تردده وفقاً لقيمة الجهد الواصل عليه.

- إذا كان هناك إزاحة في التردد أو الطور بين الإشارتين الداخلتين على كاشف الطور فان الإشارة الناتجة على مخرج الكاشف سوف تتغير وفقاً للإزاحة وبعد مرور الإشارة عبر المرشح (LPF) تنتج إشارة(DC)سوف تقوم بتعديل تردد المذبذب (VCO) لتصحيح الإزاحة المدخلة في التردد أو الطور. هذه الإشارة التي قامت بتعديل تردد المذبذب تسمى إشارة الخطأ (Error Signal) والتي تكون مطابقة لإشارة التعديل المرسلة.

- إذا لم يكن هنالك إشارة على المدخل فان اخرج على كاشف الطور والمرشح يكون صفراً وبالتالي فليس من إشارة تقوم بتعديل تردد المذبذب (VCO) ويبقى على تردده الأصلي المصمم عليه.

- لو فرضنا دخول إشارة بتردد معين سوف يقوم كاشف الطور بمقارنة هذا التردد مع تردد المذبذب (VCO) وينتج إشارة تتناسب مع قيمة الفرق في التردد والتي بعد مرورها عبر المرشح تقوم بتعديل تردد المذبذب في اتجاه يقلل من الفرق الترددي. عندما يصبح تردد المذبذب مساوي لتردد الإشارة الداخلة تصبح الدائرة في حالة ما يسمى المغلقة (Locked).

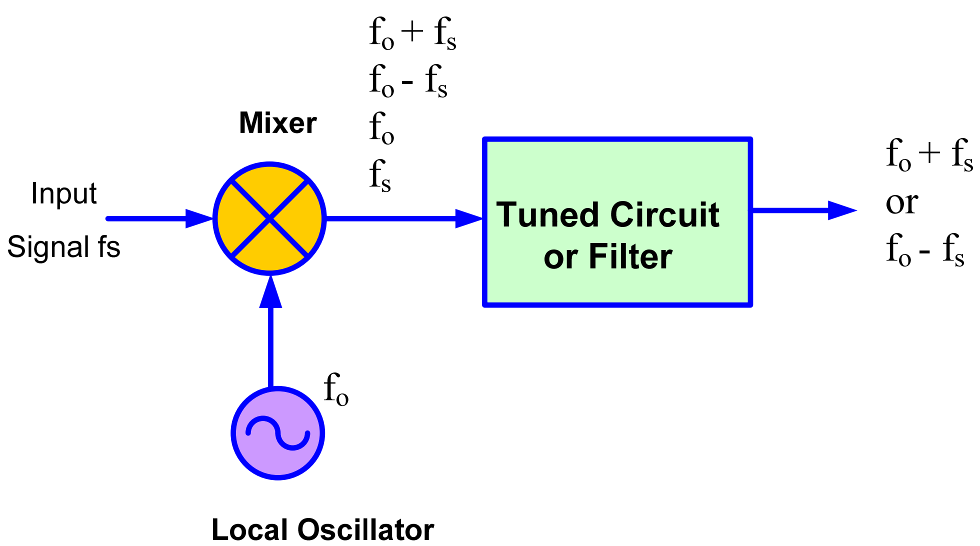
- إذا ما تغير تردد الإشارة الداخلة يقوم كاشف الطور والمرشح بتكوين إشارة جديدة مباشرة (DC) تتحكم بتردد المذبذب لتجعله مساوي لتردد الإشارة الداخلة مما يبقي الدائرة في حالة الانغلاق. بمعنى آخر تقوم دائرة حلقة الطور المغلقة بتتبع (Tracking)إشارة الدخل.

6- 3 دوائر الخلط والمحولات Mixers and Convertors:

تستخدم دوائر الخلط أو المحولات لنقل الترددات من قيم لأخرى (أعلى أو أدنى). هناك نوعان من تحويل الترددات:

- التحويل للأعلى (Up conversion) ويعني نقل التردد إلى مجال ترددي أعلى.
- التحويل للأدنى (Down conversion) ويعني نقل التردد إلى مجال ترددي أدنى.

يتضح مما سبق أن عملية الخلط أو تحويل التردد شبيهة بعملية التعديل (Modulation). يظهر الشكل (6- 8) دائرة خلط بسيطة توضح فكرة العمل.



الشكل (6- 8) دائرة الخلط

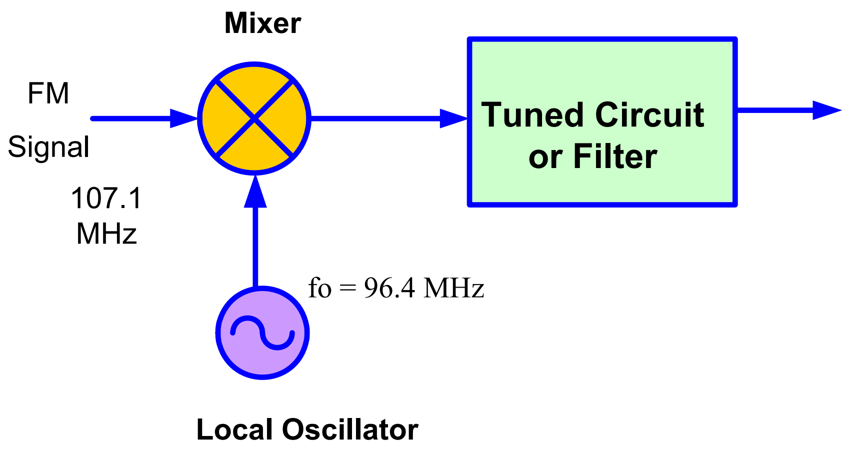
يظهر من الشكل أعلاه أن مخرج دائرة الخلط يحوي الترددات التالية:

- تردد الإشارة الأصلية fs .
- تردد المذبذب المحلي (LO) بقيمة fo .
- حاصل جمعهما fo + fs .
- حاصل طرحهما fo – fs.

بعد مرور الإشارة على دائرة توليف أو مرشح يبقى حاصل جمعهما أو طرحهما وهو ما نحتاجه. إن العنصر الرئيسي لدائرة الخلط هو عنصر الكتروني ذو خاصية غير خطية بين الدخل والخرج (مثل الصمام الثنائي والترانزستور). كمثال على ذلك نقدم دائرة خلط باستخدام الصمام الثنائي (الشكل 6- 9) ودائرة باستخدام الترانزستور (الشكل 6- 10).

مثال 6- 1:

لديك إشارة(FM)بتردد (107.1 MHz) يراد تحويلها إلى تردد مرحلي (10.7 MHz) وذلك في جهاز الاستقبال. إذا علمت أن تردد المذبذب المحلي (96.4 MHz)، أوجد الترددات الناتجة على مخرج دائرة الخلط (الشكل 6- 9).



الشكل (6-9)

الحل:

حسبما أوضحنا سابقاً ستظهر الترددات التالية على مخرج دائرة الخلط:

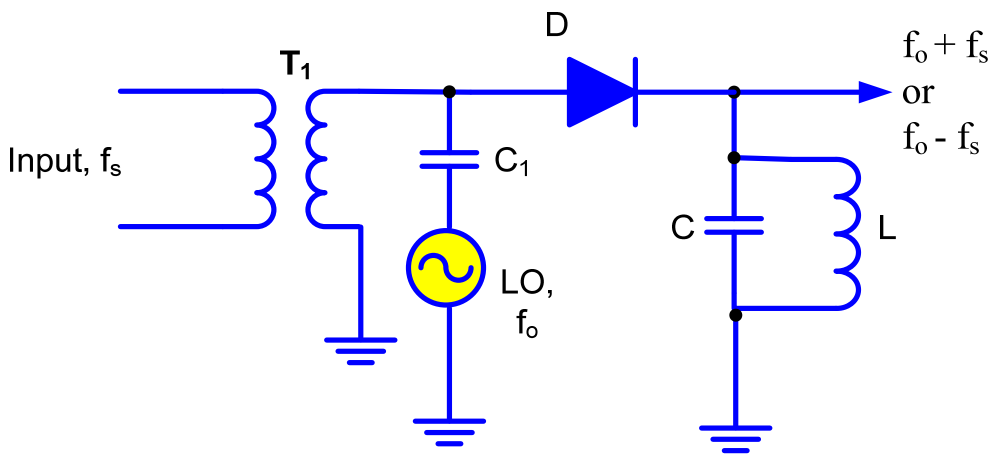
- تردد الإشارة الأصلي 107.1 MHz
- تردد المذبذب المحلي 96.4 MHz
- التردد الجانبي العلوي 107.1 MHz + 96.4 MHz = 203.5 MHz

- التردد الجانبي السفلي 107.1 MHz - 96.4 MHz = 10.7 MHz.

للحصول على التردد المطلوب (10.7 MHz) نصمم دائرة التوليف أو المرشح (Tuned Circuit or Filter) لتقوم بتمرير هذا التردد فقط مع إلغاء بقية الترددات.

6- 3 - 1 دائرة الخلط باستخدام الصمام الثنائي Diode Mixer:

في حالة استخدام الصمام الثنائي (الشكل 6- 10) يتم إدخال الإشارة المراد تحويل ترددها وإشارة المذبذب المحلي على الصمام الثنائي. يجب مراعاة أن تكون قيمة جهد الانحياز تحقق العمل ضمن المنطقة غير الخطية لعمله، بينما يتم اختيار قيم المكثف(C) والملف (L) في دائرة التوليف لتمرير التردد (حاصل الجمع أو حاصل الطرح) بينما تقوم بإلغاء الترددات الأخرى.

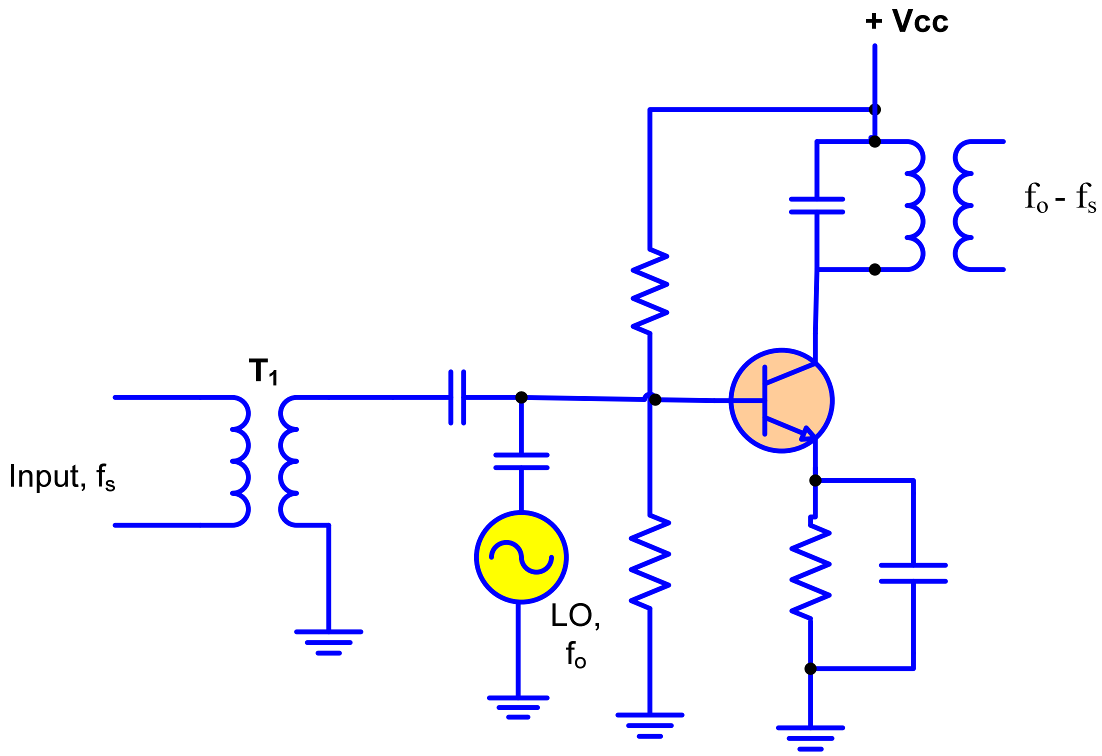


الشكل (6- 10) دائرة خلط باستخدام الصمام الثنائي

6- 3 - 2 دائرة الخلط باستخدام الترانزستور ثنائي القطبية Bipolar Transistor Mixer

في حالة استخدام الترانزستور ثنائي القطبية (الشكل 6- 11) يتم إدخال الإشارة المراد تحويل ترددها وإشارة المذبذب المحلي على قاعدة الترانزستور. يجب مراعاة أن يكون انحيازه ضمن المنطقة غير الخطية لعمله، كذلك يتم اختيار قيم المكثف C والملف L في دائرة التوليف لتمرير التردد (حاصل الطرح) بينما تقوم بإلغاء الترددات الأخرى. تختلف هذه الدائرة عن سابقتها من ناحية إمكانية الحصول على التكبير (Transistor Gain).

يمكننا تحسين أداء الدائرة السابقة باستخدام ترانزستور تأثير المجال (FET).



الشكل (6- 11) دائرة خلط باستخدام الترانزستور ثنائي القطبية

6- 4 مقارنة بين تعديل السعة وتعديل التردد AM and FM Comparison:

بعد دراستنا لكل من تعديل السعة وتعديل التردد نستطيع توضيح النقاط التالية:

1- نظام (AM)بسيط من ناحية الدوائر الالكترونية اللازمة لتوليده والكشف عنه بينما في نظام(FM)الدوائر أصعب.

2- مساحة التغطية في نظام(AM)أوسع منها في حالة نظام (FM) ويعود ذلك أنه في حالة(AM)تكون الترددات أدنى وبالتالي الأطوال الموجية أطول مما يغطي مساحة أوسع للبث.

3- نظام(AM)أسهل لعملية التوليف وضبط الترددات مما يجعله مناسباً للاستخدام في أنظمة البث على الموجات القصيرة.

4- لكن نظام(AM)غير فعّال (Inefficient) وسريع التأثر بالتشويش.

5- إن الميزة الرئيسية لنظام (FM)هو الجودة الصوتية العالية (Audio Quality) والمناعة العالية ضد التشويش.

6- تزداد الجودة الصوتية كلما زادت قيمة الانحراف الترددي(Δf).

7- إن السلبية الرئيسة لنظام(FM)هو حاجتها لعرض نطاق ترددي أعلى مقارنة مع نظام(AM).

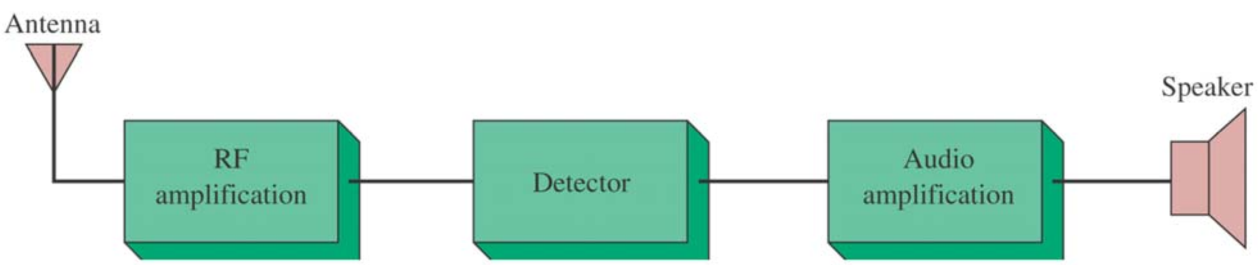
6- 5 دوائر الاستقبال Receiver Circuits:

كما هو معلوم فان الإشارات المرسلة من دوائر الإرسال تصل إلى دوائر الاستقبال ضعيفة جداً حيث تكون قد فقدت معظم قدرتها إضافة إلى التشويه الذي يحصل لها نتيجة تأثير مختلف أشكال التشويش والضوضاء عليها. إن أهم ما يميز أي دائرة استقبال للإشارات المرسلة:

- القدرة على اختيار الإشارة المرسلة من بين العدد الهائل للإشارات الموجودة في وسط الإرسال. وتسمى هذه الخاصية الاختيارية (Selectivity).

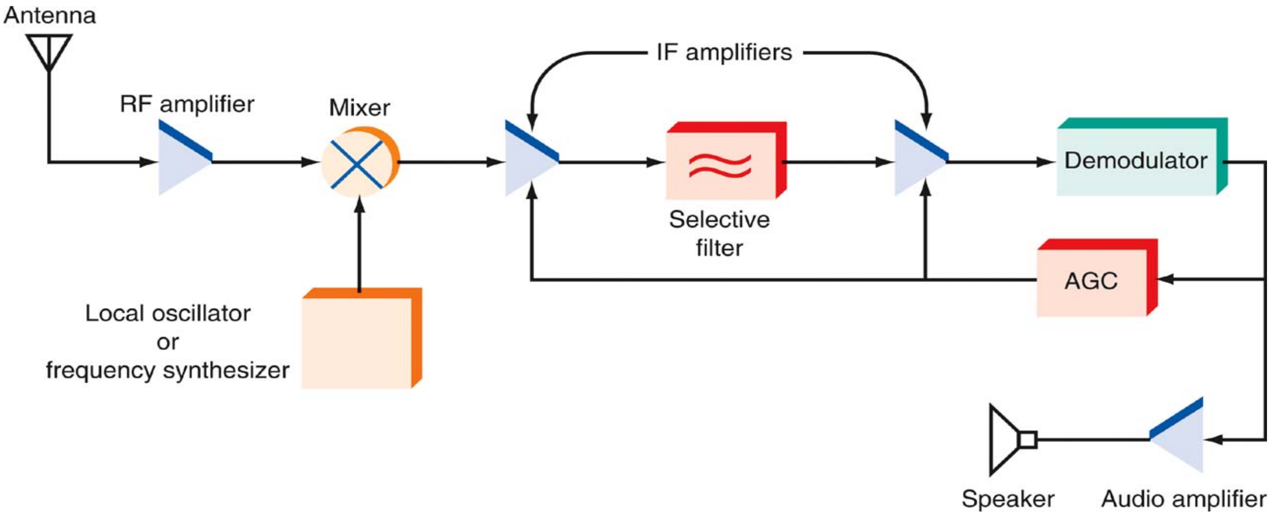
- القدرة على تقديم تكبير (Amplification) مناسب للتمكن من إزالة التعديل و استرجاع الإشارة الأصلية. تسمى هذه الخاصية الحساسية (Sensitivity).

تتكون دائرة الاستقبال (الشكل 6- 12) بشكل رئيس من مكبر راديوي (RF Amplifier) لتكبير الإشارات المستقبلة من الهوائي يتبعه دائرة إزالة التعديل (Demodulator) يليها دائرة مكبر صوتي (Audio Amplifier).



الشكل (6- 12) نموذج مبسط لدائرة الاستقبال

هنالك أشكال مختلفة لتنفيذ دوائر الاستقبال منها البسيط ومنها المعقد. إن أشهر دوائر الاستقبال المستخدمة ما يسمى جهاز الاستقبال الهيترودايني (Superhetrodyne Receiver) والذي نوضحه على الشكل (6- 13). إن مصطلح هيترودايني يعني الفعل المتغاير الفوقي.



الشكل (6- 13) جهاز الاستقبال الهيترودايني

مكونات الدائرة:

- مكبر راديوي RF Amplifier.
- دائرة الخلط Mixer .
- مذبذب محلي أو مقياس ترددي معياري Local Oscillator or Frequency Synthesizer.
- مكبر مرحلي Intermediate Frequency (IF) Amplifier.
- مرشح انتقائي Selective Filter.

- دائرة إزالة التعديل Demodulator.
- دائرة التحكم الآلي بالتكبير Automatic Gain Control (AGC).
- المكبر الصوتي Audio Amplifier.
- السماعة الخارجية Speaker.

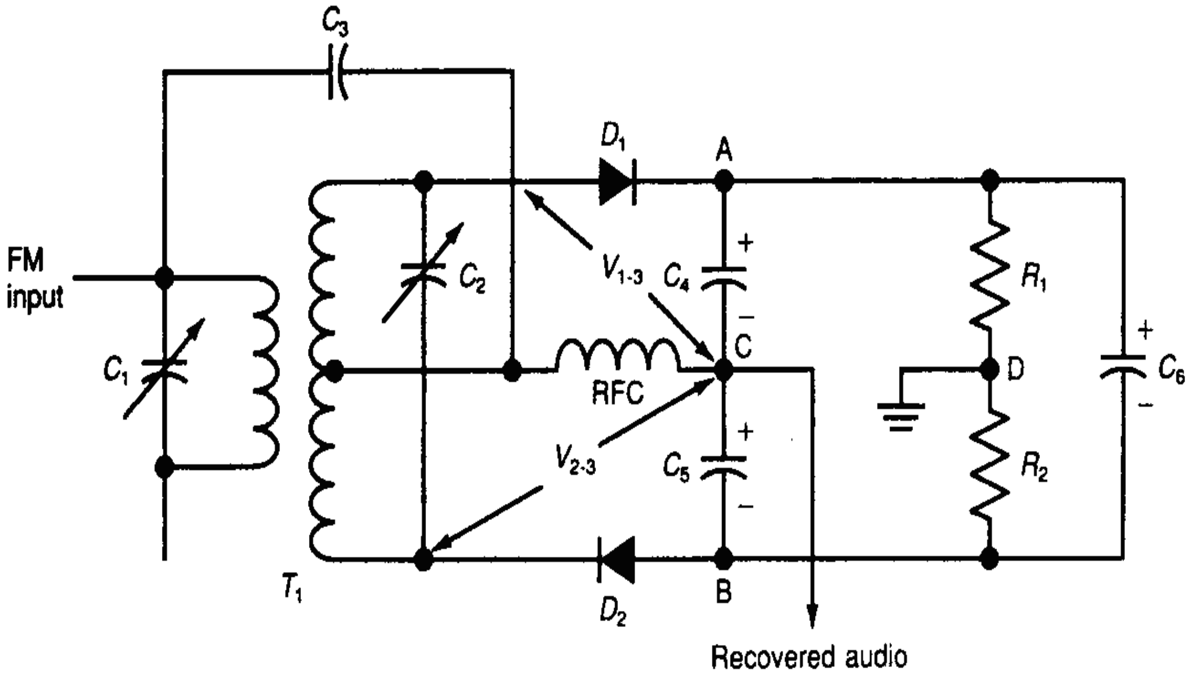
يتم استقبال الإشارة عن طريق الهوائي (Antenna) والتي تكون ذات قدرة ضعيفة جداً مما يستدعي تكبيرها مباشرة بواسطة المكبر الراديوي ومن ثم تحويل التردد العالي (RF) إلى تردد وسيط ذي قيمة أدنى (IF Frequency) وذلك لصعوبة التعامل الكترونياً مع الترددات العالية. تختلف قيم الترددات الوسيطة من نظام إلى آخر حسبما هو موضح في الجدول(6- 1.)بعد ذلك يتم تمرير الإشارة عبر مرشح انتقائي لتمرير تردد (IF) مع إجراء التكبير اللازم حتى تتمكن دائرة إزالة التعديل من استرجاع الإشارة الأصلية المرسلة حيث يتم تكبيرها قبل إدخالها على السماعة الخارجية. يجب التحكم بقيمة التكبير للمستقبل وذلك عن طريقة دائرة التحكم الآلي (AGC).

جدول 6-1 الترددات الوسيطة (IF) المستخدمة في مختلف الأنظمة:

النظام	التردد الوسيط (IF)
أجهزة التلفاز	30 MHz to 900 MHz
راديو FM	5.5 MHz, 10.7 MHz, 98 MHz.
راديو AM	450 kHz, 455 kHz, 460 kHz, 465 kHz, 470 kHz, 475 kHz, 480 kHz
أنظمة الميكروويف	250 MHz, 70 MHz
الرادار	30 MHz
الاتصالات عبر الأقمار الاصطناعية	70 MHz, 950-1450 Downlink first IF
أجهزة الفحص الراديوية RF	310.7 MHz, 160 MHz, 21.4 MHz

أسئلة وتمارين:

1- ما وظيفة كل من العناصر التالية في الدائرة الموضحة أدناه:



الشكل (6- 14)

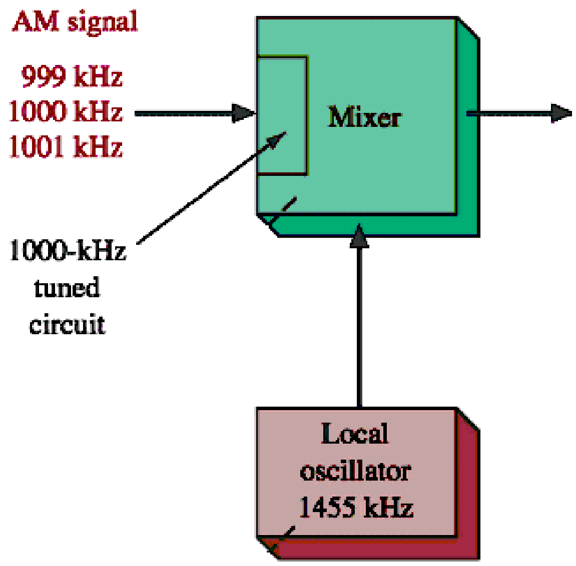
- المكثف C3.
- الصمام الثنائي.
- المكثفان C1 ، C2 .
- المقاومات R1, R2 .

2- لديك دائرة تعديل متوازن (Balanced Modulator) تعمل على تردد حامل يساوي(3 MHz) وإشارة تعديل بتردد(1.5 kHz). ما هي قيمة التردد المتوسط للمرشح لتمرير الجانب الترددي الأدنى؟

3- ما هي أوجه الشبه والاختلاف بين كاشفي تعديل النسبة و المميّز من نوع فوستر سيلي؟

4- لماذا تقوم دائرة حلقة الطور المغلقة (PLL) بتتبع (Tracking)إشارة الدخل؟

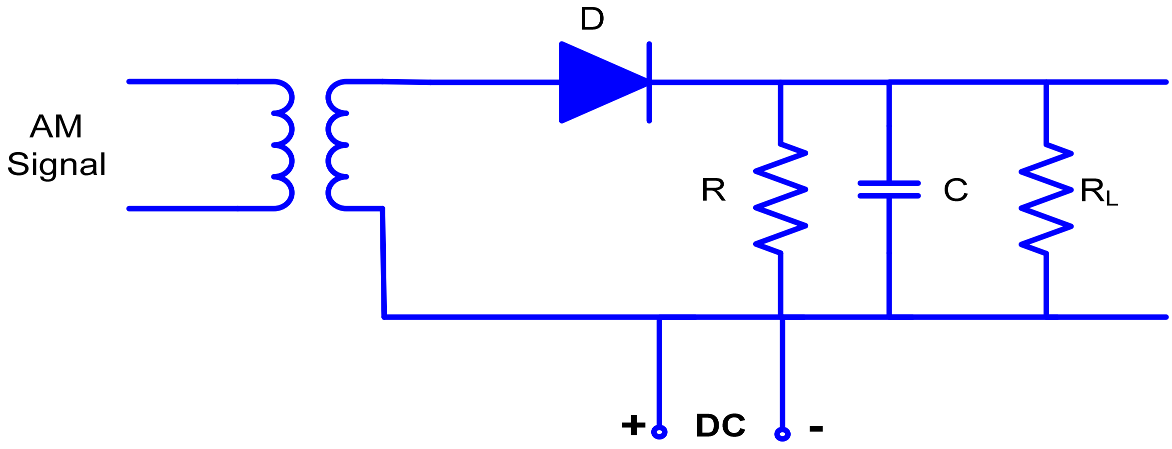
5- لديك دائرة خلط موضحة أدناه:



الشكل (6-15)

أوجد قيم الترددات التي تظهر على مخرج الدائرة.

6- لديك دائرة كشف لإزالة التعديل:



الشكل (6-16)

أوجد:

أ- وظيفة المكثف(C)والمقاومة(R).

ب- لماذا نضيف الجهد المباشر (DC)؟

جـ- على أي أساس نقوم باختيار قيم المكثف(C)والمقاومة(R)

7- لماذا تستخدم العناصر الالكترونية في الجزء غير الخطي في دوائر الخلط أو تحويل التردد؟

المراجع

1- Floyd T. L., Electronic Devices, fifth edition, 1999.

2- Frenzel L. E., Communication Electronics, third edition, 2001.

3- Shrader R. L., Electronic Communications, sixth edition, 1991.

4- Temes L., Schultz M.E. Electronic Communications, Schaum's outlines, second edition, 1998.

5- Smith J.R., Modern Communication Circuits, second edition, 1998.

6- Miller G. M., Beasley J.S., Modern Electronic Communications, seventh edition, 2002.

7- Bogart T.F., Electronic Devices and Circuits, fourth edition, 1997.

المراجع العربية:

1- تقنية الالكترونيات، الجزء الأول، المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني 1993م.

2- تقنية الالكترونيات، الجزء الثاني، المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني 1993م.

3- معجم مصطلحات الاتصالات، وزارة البريد والبرق والهاتف، إدارة التدريب، 1998.

المحتويات

الوحدة الأولى:

أساسيات مكبرات العمليات:

الوحدة الثانية :

تطبيقات مكبرات العمليات :

الوحدة الثالثة :

المرشحات النشطة

الوحدة الرابعة:

مولدات الذبذبات :

الوحدة الخامسة :

دوائر التعديل

الوحدة السادسة :

دوائر إزالة التعديل